

Negyvenéves a váci cementgyártás

Sáros Bálint

Az idén múlt 40 éve, hogy a Dunai Cement- és Mészmű kapuján kigördült az első cementszállító tartálykocsi. A váci cementgyár története azonban sokkal korábban kezdődött.

Már az 1950-es évek elején tervezték új cementgyár létesítését, az akkori viszonyok között egy aknakemencés üzemet. A megkezdett munkálatokat (bányanyitás, kötélpálya-építés, gyári földmunkák) többször is megállították. Ma azt mondhatjuk, szerencsére. A végérvényes, 1959-ben a munkák folytatására született döntés egy korszerű gyár megépítésének a lehetőségét ígerte. Mindekelőtt a nagy piac, Budapest és környéke közelsége, a meglévő infrastruktúra, az olcsó szállítással kecsgetető vízi útvonal melletti telepítés és a Naszály mészkőkészlete kedvező feltételeket kínáltak az 1 millió tonna/év kapacitásra tervezett új üzemnek.

A hazai cementellátás igényelte az új gyár termékeit, ezért az akkori technikai-gazdasági lehetőségek közepette biztosították, hogy az üzem határidőre elkészüljön. De hát a közel 1 millió köbméter föld megmozgatása, a mélyalapkodások gödreinek kubikus és kordélyos módszerekkel való kiemelése, a nagy fesztávú csarnokok, magas építmények és silók megépítése az akkor rendelkezésre álló technológiákkal mérnöktől, munkástól egyaránt nagy teljesítményeket követelt. Nem utolsósorban az NDK-beli terv- és gépszállítóknak, a hazai szerelővállalatoknak köszönhetően a mű 1963-ra, az előírtnál korábban elkészült.

A „zöldmezős” telepítés kedvező technológiai elrendezést kínált, a kissé „szellős” elhelyezés viszont hosszabb szállítási utakat eredményezett. Ugyanakkor kiváló feltételeket teremtett a későbbi rekonstrukció számára. Egy cementgyárban a technológiai eljárás a meghatározó. Az építés időszakában (1959–1963) Nyugat-Európában az első Humboldt-hőcserélős, szárazeljárással működő kemencéket létesítették, teljesítményük alig haladta meg a Vácott épülő félszáraz-eljárású Lepol-kemencék teljesítményét. Így a választott technológiai eljárás, ha nem is számított a legújabbnak, a fejlett cementiparral rendelkező országokban is standard megoldásnak értékelhető.

Egy új gyár indítása, a termelés felfuttatása mindig nehézségekkel jár együtt. Nem volt ez másképpen a váci cementgyárban sem. A legnagyobb probléma a berendezések folyamatos működésének biztosításával volt. Bár a technológia megfelelt az akkori nemzetközi színvonalnak, a gépkonstrukciók 30 évvel korábbi megoldásokat képviseltek. Az elavult konstrukcióhoz a gépgyártásban alkalmazott gyenge szerkezeti anyagok társultak, s az eredmény a gyakori meghibásodás, a nagy alkatrész- és javítási igény, a nem megbízható működés lett. Néhány más tényező, mint a nem kielégítő nyersanyagellátást nyújtó kőbánya-technológia, a gép- és alkatrész-ellátási

gondok, egyes berendezések elégtelen teljesítménye is hozzájárult a termelésfelfutás nehézségeihez.

Az üzembe helyezést tehát javítási program követte, amely jó néhány műszaki intézkedés végrehajtásával a működés stabilitásának növekedését szolgálta. A kijavítás azonban összekapcsolódott a bővítési projekttel. A hazai cementtermelés ugyanis nem tudta követni az igények növekedését, 1970-re már 1 millió tonna körüli importtal lehetett csak az ellátást biztosítani. Ennek megelőzésére határozták el a bővítést Vácott, egy 300 ezer tonnás új kemence építésével kívánták a gyár kapacitását 1,3 millió tonnára bővíteni. Az égetési fázist megelőző és követő keresztmetszetek bővítése nélkül végrehajtott fejlesztés hosszú időre adott munkát a gyár valamennyi dolgozójának. Szolgáljon a gyár mérnökeinek-munkásainak dicséretére, hogy a váci gyárban az NDK-beli testvérüzemeknél jobb eredményeket értek el, és reális termelési előirányzataikat rendszeresen teljesítették.

Időközben persze sok minden épült: 682 lakás és a telephez tartozó oktatási, kereskedelmi, egészségügyi és szolgáltató létesítmények (1963). További termelőegységeket (zsákgyár 1964, mészüzem 1968) helyeztek üzembe. A munkaerő-ellátás hosszú ideig az üzemeltetés kulcskérdése volt.

A környezetvédelem tekintetében főként a szilárdanyag-emisszió rontotta kezdettől fogva a váci gyár hírnevét. Az ok meglehetősen prózai: elsősorban a technológiával együtt szállított portalanítóberendezések (zsákos szűrők, elektrofilterek) nem feleltek meg még a korabeli követelményeknek sem. A megoldáshoz legfőképpen az anyagi eszközök hiányoztak. A termelés felfutásával párhuzamosan vált Vác városa a „piszkos tizenkettő klub” tagjává.

A gyár igyekezetét mutatja, hogy 1975-ben módszeresen hozzákezdett egy portalanítási program megvalósításához. Ennek eredményeként 1980-ra – a kemencék kivételével – valamennyi porforrást korszerű zsákos szűrővel láttak el. A porkibocsátás zömét produkáló 3 Lepol-kemence villamos szűrőinek cseréje azonban nem volt finanszírozható.

A 80-as évek elején a gyár megérett a rekonstrukcióra. A technológiai berendezések fizikai és erkölcsi avulása, működési paraméterei (egységteljesítmény, energiafelhasználás, kiszolgálási és javítási igény stb.) gazdaságilag is indokoltta, a kemencék környezetvédelmi helyzete halaszthatatlanná tette a gyár technológiájának megújítását. A felismeréstől azonban nagyon hosszú út vezetett az 1987–1991 között végrehajtott kemencerekonstrukcióig.

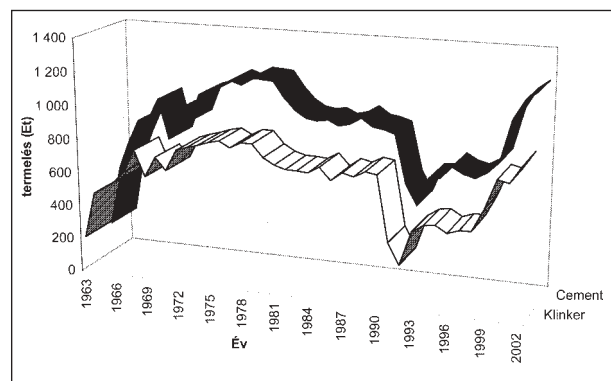
A nagyberuházást a bányatechnológia korszerűsítése (1984), a távolsági szalag megépítése (1986) előzte meg. A rekonstrukció keretében létesült az előhomogenizáló

tároló, a vertikális nyersmalom, az előkalcinációs klinkerkemence (3000 t/nap) rostélyhűtővel, a gyártó-sorhoz tartozó, az előírásoknak megfelelő hatásfokú portalanítóberendezésekkel. A fejlesztés keretében a IV. kemence is megújult. A klinkervonal korszerűsítésével azonban a tervezett műszaki változásoknak csak az első üteme valósult meg. Azóta számos beruházás kivitelezése, így a palettázócsarnok (1994) és az automatikus csomagoló- és palettázógép (1997) létesítése, az új klinkersiló üzembe helyezése (1996), a kikötő felújítása, a tároló-klinkerörllő rendszer korszerűsítése után az új cementmalom beállításával vált teljessé a váci gyár megújítása.

A tágon értelmezett rekonstrukció persze ennél sokkal több munkát, befektetést igényelt. Aki ma összehasonlítja a gyár képét egy korábbi, mondjuk a 20 évvel ezelőtti megjelenésével, láthatja, mennyire megszépültek az üzemek és környezetük. A régi épületek és berendezések (Lepol-kemencék, mészegető aknakemencék) lebontása, a megmaradt épületek tatarozása, a parképítés a gyár egész területén a külső szemlélőben is a rendezettség, a környezet iránti igényesség, a gondos gazda által üzemeltetett létesítmény benyomását kelti. De legalább ennyire értékeli a szakember is a technikai megújulást, amely növekvő teljesítményt, kiváló műszaki paramétereket és termékeket, magas termelékenységet és gazdasági sikereket eredményezett.

A termelési eredmények alakulása, a kibocsátott termékek mennyisége és minősége, a működési paraméterek híven tükrözik a gyár fejlődését.

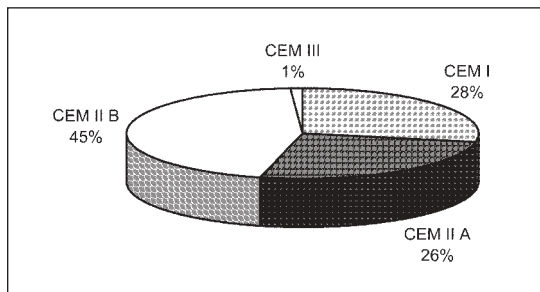
- Megindulása óta a váci gyár több mint 27 millió tonna klinkert és 36 millió tonnát meghaladó cementet gyártott. A termelés felfutását követően visszaesés a gazdasági recesszió éveiben következett be (1. ábra). Ma újra növekszik a termelés, rekordot (1,2 millió t feletti termelést) a 2002. év hozott.



1. ábra. A gyár termelése

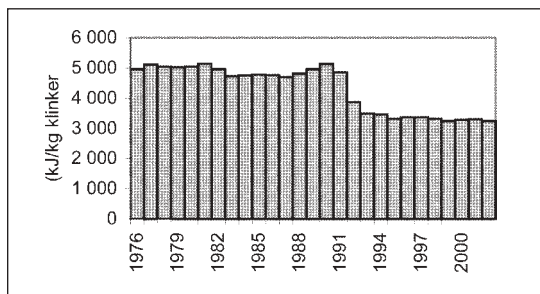
- A hagyományosan kiváló klinkerminőség széles termékpalletta előállítását teszi lehetővé. A tiszta portlandcementek magas aránya (28%) mellett a kibocsátott nagyobb és kisebb klinkertartalmú ko-

hósalakos cementek változatos piaci igények ki-elégítésére adnak módot. Megkezdődött a speciális (kompozit-) cementek gyártása is. A termékcsoportok 2002. évi arányait a 2. ábra mutatja.



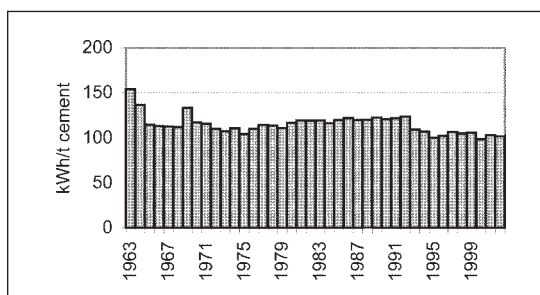
2. ábra. Termékösszetétel

- A fejlesztések eredményét tükrözik az energiafelhasználási mutatók. Az energiaárak utóbbi 10 évben tapasztalt mértékű növekedését csak racionalizálással lehetett ellensúlyozni. A fajlagos hőfelhasználásnak a Lepol-kemencéknél tapasztalt magas szintjét a technológiai váltással lehetett csökkenteni (3. ábra).

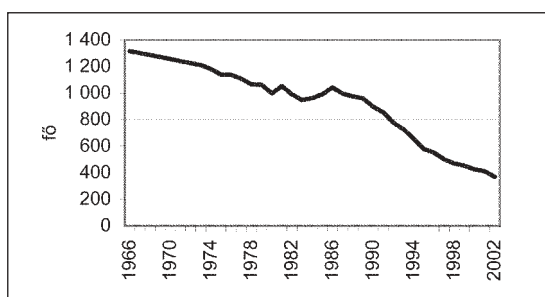


3. ábra. A hőfelhasználás alakulása

A hőenergia-költségek további mérséklése tüzelőanyag-váltást (széntüzelést) és alternatív fűtőanyagok alkalmazását teszi szükségessé. A villamosenergia-felhasználás hullámozása a berendezések korszerűsége mellett a gyártott cementfajták arányát is függ. A nagy szilárdságú és nagy kezdőszilárdságú cementfajták magas hányada több villamos energiát igényel. Ennek ellenére a korszerűsítés hatása itt is megmutatkozik (4. ábra).



4. ábra. Fajlagos villamosenergia felhasználás



5. ábra. A gyár létszáma

- Látványosan fejlődött a gyár környezetvédelmi helyzete, ez az utóbbi 20 esztendő következetes környezeti politikájának az eredménye. A legnagyobb változást kétségtelenül a kemencerekonstrukció hozta, a Lepol-kemencék termékre vetített 7-8%-os poremissziója a fejlesztést követően 0,01%-ra csökkent. A szilárdanyag-kibocsátás kedvező alakulása mellett, a fajlagos hőfelhasználás jelentős csökkenése következtében az emittált gázkomponensek (CO₂, CO, SO₂, NO_x) mennyisége is jelentősen kisebb lett. Az üzem és közvetlen környezetének kedvező átalakulásáról már szóltunk.
- A gyár a megindulást követően hosszú éveken át küzdött a munkaerőhiánnyal. A legmagasabb létszám 1966-ban 1316 fő volt. A létszám alakulásában (5. ábra) több tényező játszik szerepet. A kezdeti állomány csökkenésének fontos tényezője a technológiai fejlesztés, a digitális irányítástechnika bevezetése, de hatással volt a korszerű üzemszervezés alkalmazása, kisebb részben az irányító szervezet módosulása is. Fejlett cementipa-

rok hasonló üzemével összehasonlítva a váci gyárat megállapítható, hogy az egyharmadára csökkent létszám még nem tekinthető véglegesnek.

A DCM – ahogyan nagyon sokan ma is ismerik – állami vállalatként, ill. az országos jellegű Cement- és Mészművek egyik gyáráként működött majd 30 évig. A cementgyárak 90-es években bekövetkezett magánosításakor az üzem külföldi szakmai befektetők tulajdonába került. Nekik is köszönhető, hogy a rekonstrukció legkritikusabb szakaszában, az üzembe helyezés során a gyár gyorsan megbirkózott a műszaki-gazdasági nehézségekkel, és a fejlődés további útja is töretlen volt. A tulajdonosok előrelátó tervezését, nagyvonalú ökonomiai és ökológiai gondolkodását elismerés illeti. A beremendi cementgyárral történt fúziót követően (1997 óta) a Duna-Dráva Cement Kft. egyik gyáráként működik.

Amikor visszatekintünk az elmúlt 40 évre és elért eredményeinkre, azt is tudjuk, hogy nem ülhetünk a babérokon. A globalizálódó világban, egyre élesedő versenyben, az EU-csatlakozás küszöbén átjutva csak az képes fennmaradni, aki többet, jobbat, gazdaságosabban tud gyártani. A tüzelőanyag-struktúra átalakítása, a másodlagos anyagok felhasználása, a termékválaszték bővítése, a technikai fejlesztés és racionalizálás a következő évek kihívása. A versenyképesség állandó fejlesztése ma tőlünk kíván helytállást. A tulajdonosok eltökélt szándéka, hogy a váci gyár változatlanul a technológiai fejlődés élvonalában maradjon, és ehhez a szükséges feltételeket biztosítják.

Rajtunk áll, hogy gyárunk a nyugat-európai élenjáró színvonalnak megfelelő, gazdaságosan működő üzem maradjon továbbra is. Ez lesz a dolgunk a következő 40 évben.

Sáros Bálint

* * *

XX. CEMENTIPAR KONFERENCIA

Hagyományos hazai cementipari konferenciáink sorában elérteztünk a tekintélyt parancsoló kerek számhoz, a huszadikhoz. Mint *Dr. Fodor Márta* ügyvezető igazgatóasszony térképpel illusztrált, nosztalgától sem mentes „történelmi visszatekintéséből” megtudhattuk, a I. számot a „Szilikátipari Ifjúsági Napok Cement Szekciójának” Miskolcon 1980. augusztus 28-29-én tartott rendezvénye viseli. Az ezt rövid megszakítással 1983-ban követő II. összejevetel már „Cementipari Napok” néven került be a krónikákba. De ettől fogva gyakorlatilag megszakítás nélkül, átszervezésektől, rendszerváltástól, privatizációtól sem zavartatva ült össze évről évre a cementesek nagy családja, hogy elmondja, milyen eredmények, vagy netán kudarcok jellemezték az elmúlt esztendőt. Még azok a szerencsések is, akik gyakorlatilag évről évre résztvevői voltunk az összejeveteleknek, meglepődtünk arra a színes térképre tekintve, amely illusztrálta, hogy kicsiny hazánk mennyi gyönyörű városa, tája adott otthont rendezvényeinknek, Egertől Harkányig, Miskolctól Tatáig.

Most éppen a hortobágyi Club Hotel volt a szállásadónk október 13–15. között. A mintegy húsz szakmai előadás hű keresztmetszetet adott a cementipar legfontosabb műszaki és gazdasági kérdéseiről. Érdekes előadásokat hallhattunk az égetés és őrléstechnológia időszerű kérdésein túl az egyre nagyobb jelentőségű környezetvédelem problémáiról, a legérdekesebb beruházásokról szóló híradások pedig demonstrálták, hogy a fejlődésben a nehézségek ellenére sincs pillanatnyi megállás.

A néha kissé feszítettnek tűnő szakmai programban kellemes kikapcsolódást jelentett valamennyiünknek *Aradi Csaba* egészséges lokálpatriotizmust sugárzó előadása, és az ezt követő, Hortobágyon elmaradhatatlan gulya-, konda- és csordanézés, csikósbemutatóval színesített szekérkirándulás.

Baráti érzéseinkben megerősödve némi nosztalgiával gondolunk vissza a kellemes októberi napsütésben zajló hortobágyi napokra. De vigasztalódunk, mert tudjuk, hogy jövőre újra találkozunk, s kíváncsian várjuk, vajon szép hazánk mely kies táját választják helyszínül a minden dicséretet megérdemlő szervezők. Nem aggódunk, van még bőségesen választék.

Révay Miklós

SZILIKÁTTUDOMÁNY

Az aprítási elmélet néhány aktuális kérdése – képlékeny viszkoelasztikus anyagok aprítása görgőjáraton

Gömze A. László

Miskolci Egyetem, Kerámia- és Szilikátmérnöki Tanszék

1. Bevezetés

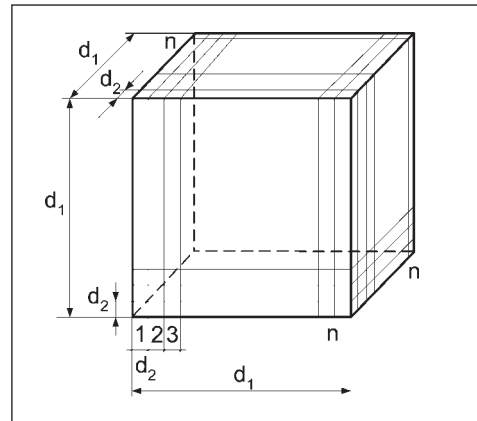
Szilárd halmazállapotú anyagok feldolgozásánál az aprítás és az őrlés az egyik legfontosabb technológiai művelet. Mind az élelmiszer-, a gyógyszer- és a vegyiparban, mind a bányászatban és a kohászatban aprítással, illetve őrléssel érik el a felhasznált vagy előállított alap-, adalék- és segédanyagok kívánt szemcseméretét és szemcsealakját – azaz a technológiailag előírt fajlagos felület nagyságát. Volumetrikus nagyságának köszönhetően különösen fontos szerepet játszik az aprítás és az őrlés a szilikátipari és az építőanyag-ipari technológiáknál, ahol a diffúzió által vezérelt kémiai átalakulások és szilárd fázisú reakciók [1, 2, 3, 4, 5 és 6] sebessége és minősége alapvetően függ az „érintkező” felületek nagyságától. Ezért ma már nem elégséges csak az aprítás és őrlés technológiai energiaigényét meghatározni, választ kell találni azokra a kérdésekre is, hogy milyen lesz az adott aprító- vagy őrlőberendezésen, gépen előállított szemcsék mérete, alakja, makroszerkezete (pl. repedések száma, mérete, jellege), valamint egymáshoz való térbeli viszonya, eloszlása.

A továbbiakban a görgőjárat mint aprítógép példáján teszünk kísérletet ezekre a kérdésekre választ találni.

2. Az aprítási elméletek fejlődéstörténetének áttekintése

2.1. Klasszikus mechanikai szemléletű aprításelmélet fejlődése

Az infrastrukturális beruházások – vasút és az úthálózat kiépülése és bővülése, valamint az aprítási elméletek fejlődése között érdekes párhuzam figyelhető meg. A XIX. század közepén a poroszországi (német) vasúthálózat dinamikus fejlődésének mintegy „melléktermékeként” Rittinger 1867-ben megalkotta az aprítás energiaszükségletének alaptörvényét [7], melynek lényege, hogy az aprítás energiaigénye arányos a keletkezett felülettel.



1. ábra. A d_1 élhosszúságú kocka „feldarabolása” egymástól d_2 távolságban lévő párhuzamos síkokkal (A Rittinger-féle aprítási elmélet értelmezése)

A Rittinger-féle aprítási elmélet könnyen megérthető az 1. ábra segítségével, ahol a d_1 élhosszúságú kockát párhuzamos síkokkal d_2 élhosszúságú kockákra aprítjuk. Ekkor aprítás után a keletkezett új kockák száma:

$$N_k = n^3. \quad (1)$$

Míg a keletkezett töretfelület nagysága:

$$A = 2 \cdot 3(n-1)d_1^2, [\text{m}^2]. \quad (2)$$

Az 1. ábra alapján ugyanakkor könnyű belátni, hogy a d_1 élhosszúságú kockán a törési síkok száma csupán:

$$N_{ts} = 3(n-1), \quad (3)$$

ahol n egyben az aprítási fok is, mivel:

$$n = \frac{d_1}{d_2}. \quad (4)$$

Amennyiben az egységnyi élhosszúságú kocka egyetlen törési sík mentén történő aprításának energiaigénye W_1 , úgy a d_1 élhosszúságú kocka d_2 élhosszúságú kockára

történő aprításához szükséges energia mennyisége:

$$W = d_1^2 \cdot N_{ts} \cdot W_1, [\text{Nm}]. \quad (5)$$

A (3) és (4) kifejezések (5)-be történő behelyettesítésével megkapjuk a d_1 élhosszúságú kocka d_2 élhosszúságú kockára történő aprításához szükséges energia Rittinger-féle egyenletét:

$$W = 3d_1^2 W_1 \left(\frac{d_1}{d_2} - 1 \right), [\text{Nm}], \quad (6)$$

amely az alábbiakat tételezi fel:

- a törőerő arányos az aprítás energiaigényével;
- a felület mentén a feszültség egyenletesen oszlik meg;
- az aprításhoz szükséges energia nagysága független az aprított anyag mechanikai és reológiai tulajdonságaitól, ugyanakkor arányos a keletkezett új felület nagyságával!

Az 1800-as évek utolsó harmadában az Európában lezajlott vasútépítési bumm során Oroszországban Kirpicsev [8] és az Egyesült Királyságban Kick [9] 1885-ben szinte egy időben alkotta meg az aprítás energiaigényének második elméletét, az úgynevezett „térfogatelmélet”. Tapasztalataik szerint a vasúti töltésekhez használt kőzetek aprításakor a töretfelületek nem párhuzamos síkok mentén, hanem a legkülönbözőbb geometriai alakzatban, sztochasztikusan jöttek létre – gyakorlatilag lehetlenné téve ezáltal az új töretfelületek nagyságának meghatározását.

Tapasztalati adatok és elméleti fejtegetések alapján Kirpicsev és Kick arra a következtetésre jutottak, hogy a szilárd testek töréséhez szükséges energia arányos az aprítandó szemcse térfogatával, valamint a testben ébredő feszültség és a rugalmas alakváltozás szorzatával. Azaz, egy d_1 élhosszúságú, kocka alakú szilárd test törésig való megfeszítéséhez szükséges energia mennyisége:

$$W = d^3 \int_0^\varepsilon \sigma de. \quad (7)$$

Ha figyelembe vesszük, hogy a rugalmas alakváltozás nagysága a

$$d\varepsilon = \frac{1}{E} d\sigma. \quad (8)$$

összefüggés szerint határozható meg, akkor (7) a következő alakban írható át:

$$W = d^3 \cdot \frac{1}{E} \int_0^\sigma \sigma d\sigma = d^3 \frac{\sigma^2}{2E}, [\text{Nm}], \quad (9)$$

ahol: σ – az anyagra jellemző törőszilárdság, $[\text{N}/\text{m}^2]$;

E – az aprítandó anyag rugalmassági modulusa, $[\text{N}/\text{m}^2]$.

Az aprítás „harmadik” elmélete csak a XX. század közepén, 1952-ben született meg. Nem véletlen, hogy ezt egy amerikai kutató, F. C. Bond [10] dolgozta ki, hiszen az 1940-es évektől kezdődően az USA – amely ekkor már Földünk vezető gazdasági és katonai hatalma – eddig

még soha és sehol nem tapasztalt vasút- és autópálya-építési dömping színhelye.

Bond elméletének lényege, hogy egy adott szemcse aprításához szükséges törési energiái meghatározásakor a felület- és a térfogatelmélet alapján kapott értékek mértani középértékét kell a számítás alapjául venni. Könnyű belátni, hogy a „Bond-törvény” szerint egységnyi térfogatú, aprítás előtt d_1 szemcseméretű szilárd test aprítási (törési) energiaigénye arányos az aprítás utáni és előtti szemcseméretnek négyzetgyökeinek reciprokával.

Vagyis:

$$W = C_B \left(\frac{1}{\sqrt{d_2}} - \frac{1}{\sqrt{d_1}} \right), [\text{Nm}]. \quad (10)$$

Az aprítás három „klasszikus” energiaelméletét 1957-ben R. J. Charles [11] sikeresen leírta egyetlen általános összefüggéssel:

$$dW = -C \frac{d(d)}{d^a}. \quad (11)$$

A d_1 szemcseméretű szilárd anyag d_2 szemcseméretűre történő aprításához szükséges törési energia értékét Charles a (11) kifejezés integrálásával határozta meg az alábbiak szerint:

$$W = -C \int_{d_1}^{d_2} \frac{1}{d^a} d(d), [\text{Nm}]. \quad (12)$$

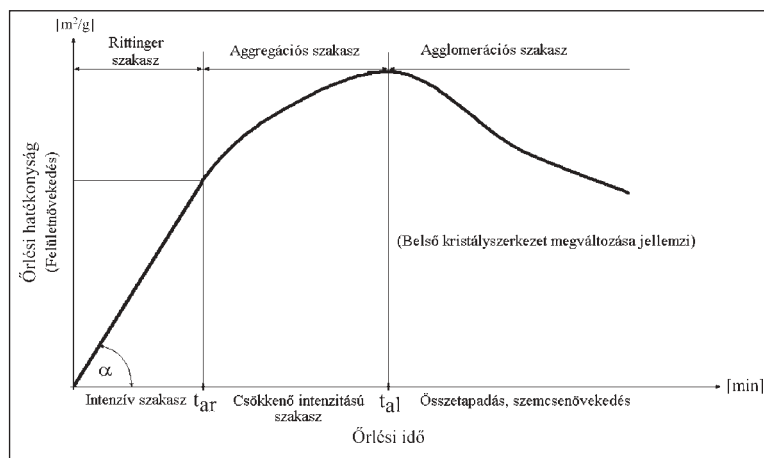
A (12) kifejezést az aprítás „alapegyenletének” is szokták nevezni, mivel az a hatványkitevő értékétől függően belőle származtathatók a Kirpicsev-Kick- ($a = 1$), a Bond- ($a = 1,5$) és a Rittinger-féle ($a = 2$) aprítási energiaegyenletek.

Az aprítás klasszikus mechanikai szemléletű elméleteit elsősorban az aprító- és őrlőberendezések – gépek – erőjáték-vizsgálatához és energiaszükségletének meghatározásához igyekeztek felhasználni. Számos tekintélyes gépészmérnök [12, 13, 14, 15] (és még sokan mások) ugyanis abból a koncepcióból indult ki, hogy az aprítógépek energiaszükséglete a következők szerint oszlik meg:

- aprításra (őrlésre) hasznosuló energia, amely arányos a keletkezett új felülettömeggel;
- aprításra nem hasznosuló, az aprított szemcsék felmelegedésére és rugalmas alakváltozásra fordítódó „káros” energia (ennek értékét fenti szerzők egzakt matematikai úton soha nem tudták meghatározni!);
- az aprítógép külső és belső súrlódására fordítódó energia.

2.2. Mechanokémiai szemléletű aprításmélet kialakulása, fejlődése

A klasszikus mechanikai szemléletű aprítási elméletek nem adtak választ a finomszemcsék előállításakor (őrlés-kor) jelentkező mechanokémiai folyamatokra; a finom-őrlést kísérő olyan részecske-kölcsönhatási jelenségekre, mint az aggregáció és az agglomeráció [16]. Az aprítási



2. ábra. A finomörlés hatékonysága
(Átvéve: Juhász A. Zoltán: *Mechanokémia és agglomeráció* című előadásából [22].
Elhangzott: MTA olvasóterme, Bp., 2003. április 16.)

elméletek mechanokémiai szempontból történő felülvizsgálatának – kiegészítésének – gondolatát elsőként szovjet tudósok [17, 18 és 19] vetették fel az 1960-as években. A mechanokémiai szemléletű aprításmélet alapjainak kidolgozásában, továbbfejlesztésében és nemzetközi elfogadtatásában azonban egy magyar tudós, Juhász A. Zoltán [20, 21, 22], a Veszprémi Egyetem professzora játszott meghatározó szerepet.

A mechanokémiai szemléletű aprításmélet szerint mechanikai terhelés hatására a szilárd anyagban reverzibilis és irreverzibilis folyamatok egyaránt lejátszódnak. Az, hogy a törés pillanata milyen feszültség és deformációértékek (nagyságok) mellett következik be, az függ az aprítás jellegétől és az aprításnak kitett anyag (szemcse) reomechanikai tulajdonságaitól.

Ugyanakkor töréskor a szemcsékben anyagszerkezeti változások mennek végbe, miközben szabad energia szabadul fel, és ezáltal a szemcsék felülete „aktivizálódik”. Az aprítandó szemcse anyagszerkezeti változásaira jellemző a diszlokáció, a vakancia és az interstíció; miközben a vakanciákban mechanikai feszültségcsúcsok alakulnak ki.

A mechanokémiai szemléletű aprításmélet választ ad a finomörléskor tapasztalható szemcse-összetapadás (agglomeráció) okaira; rámutatva, hogy a szemcsék finomaprításakor a keletkező „új” felület **aktív** válik, és ezen az aktív felületen új kötések, új kristályszerkezetek jönnek létre (2. ábra).

A finomörlés hatékonyságának mechanokémiai szemléletű vizsgálata ma már valamennyi iparilag fejlett országban ismert és elfogadott. Kidolgozásában és hazai elterjesztésében Juhász professzor mellett meghatározó szerepet vállalt és játszik ma is Opoczky Ludmilla [23, 24, 25], akinek kutatásai nagymértékben hozzájárultak a felületaktív anyagok őrlést segítő hatásmechanizmusának tisztázásához és ezen anyagok cementipari alkalmazásához.

2.3. Technológiai szemléletű aprításmélet kialakulása, fejlődése

Az 1970-es évek elején a Szovjetunió olyan óriási szociális és infrastrukturális fejlesztések, beruházások színhegye, mint a házigyári és égetett kerámia lakásépítési program, a szövetséges köztársaságok közötti nyugat-kelet és észak-dél autópálya-építési és úthálózat-bővítési program, valamint a Bajkál–Amur vasútvonal (BAM) építési programjának indítása. Ezek a gigantikus építkezések a legkülönbözőbb fizikai és mechanikai tulajdonságú, kémiai és ásványi összetételű anyagok eddig még sehol nem tapasztalt mennyiségű aprítását tette szükségessé. Mindezt a legkülönbözőbb szemcsemérettel és szemcseszerkezettel. Ez technológiailag minden korábbinál hatékonyabb, ugyanakkor energiatakarékosan működtethető aprítógépek és őrleberendezések kifejlesztését és tömeges üzembe állítását tette szükségessé. Így nem véletlen, hogy az aprítandó anyag fizikomechanikai és reológiai tulajdonságait, valamint az aprítógép (őrleberendezés) geometriai és műszaki-technológiai paramétereit egyaránt figyelembe vevő technológiai szemléletű aprításmélet az 1970-es évek elején a Szovjetunióban született meg [26, 27, 28 és 29].

Az **új**, anyagspecifikus és berendezésorientált technológiai szemléletű aprítási elmélet alapjainak kidolgozásában – moszkvai ösztöndíjas diákként [26, 27], majd később itthon kezdő mérnökként – jelen tanulmány szerzőjének sikerült a kezdetektől részt venni. Így a képlekeny viszkoelasztikus, bányanedves agyagásványok reológiai modelljéből és reomechanikai anyagegyenletekből kiindulva elsőként határozta meg az aprító simahengermű részébe behúzott agyagásványok áramlási és deformációs sebességviszonyait leíró matematikai egyenleteket [29] – számíthatóvá téve ezzel az adott aprítógépen tapasztalt intenzív keveredést és homogenizálódást. Hasonlóan sikerült matematikailag levezetnie és megha-

tározni a hengerrésen áthaladva aprózódó képlékeny viszkoelasztikus agyagásványokban ébredő csúsztató- és nyomófeszültségek nagyságát a résben elfoglalt pillanatnyi geometriai helyzet függvényében [30, 31 és 32].

1980-ban megszületett a viszkózus üveglvadék hengerlésének matematikai modellje [33], majd 1982-re szovjet tudósokkal [34] együtt sikerült matematikailag leírni olyan viszkorugalmas anyagok simahengerekkel történő aprításának elméleti összefüggéseit, mint amilyen a mészkő vagy a kőszén.

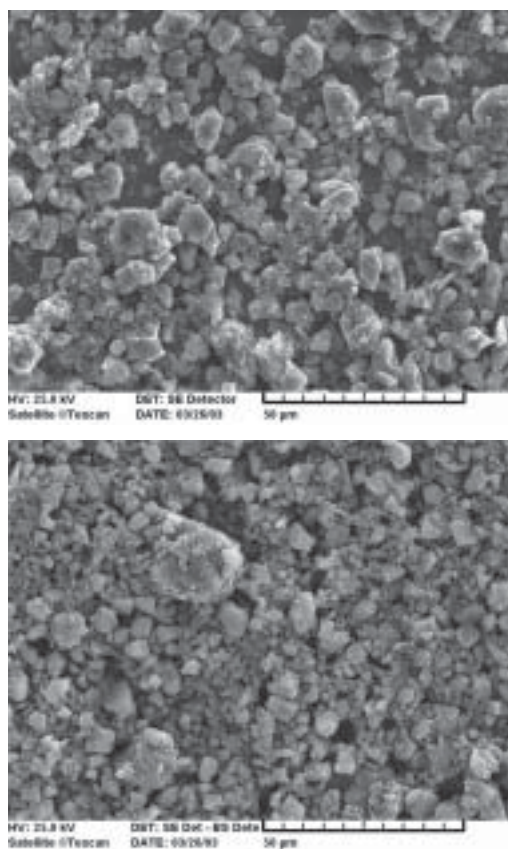
A technológia szemléletű – az aprítandó anyag reomechanikai tulajdonságait és annak aprítás közben végbemenő változásait, valamint az aprítógép geometriai és műszaki-technológiai paramétereit figyelembe vevő [35] – aprítási elmélet előnye, hogy anyag- és berendezésspecifikusan tárja fel és határozza meg a szemcsék aprítódására és egymáshoz viszonyított elmozdulására (keveredésére és homogenizálására) fordítandó energiaszükségletet mint technológiailag hasznos energiát.

3. Mechanokémiai jelenségek előállítása és igazolása görgőjáraton

A Miskolci Egyetemen a **Kerámia- és Szilikátmérnöki Tanszék** rendelkezik olyan laboratóriumi görgőjárat – kollerrel – (3. ábra), amely kiválóan alkalmas a különböző kémiai és ásványi összetételű, valamint fizikomechanikai és reológiai tulajdonságú anyagok aprítására, őrlésére, keverésére és homogenizálására. Multifunkcionális tulajdonságainak köszönhetően ezt a berendezést előszeretettel használják oktatóink a tanszéken oktatott szinte valamennyi tárgy gyakorlatánál a finomórléskor lejátszódó mechanokémiai jelenségek bemutatására, valamint az adott laboratóriumi gyakorlat által megkívánt szemcseméretű és szemcseszerkezetű anyagok – keverékek – előállítására.



3. ábra. A Kerámia- és Szilikátmérnöki Tanszéken használt laboratóriumi görgőjárat



4. ábra. A STRONG & MIBET Rt. által használt mészkőliszt laboratóriumi görgőjáraton 20, ill. 40 percig történő továbbőrlés után készített SEM-felvétele

Az aprításkor, finomórléskor jelentkező mechanokémiai jelenségek a görgőjáraton (kollerén) történő aprításkor is megfigyelhetők. Az aprítás hatékonyságára a 2. ábrán bemutatott jelleggörbe felvételéhez – az aggregáció kezdeti idejének (t_{ar}) és az agglomeráció kezdeti időpontjának (t_{al}) meghatározásához – az alábbi függvénykapcsolat állítható fel:

$$t_{ar} = f(Q, m, D, n, t_0), \text{ [min]}, \quad (13)$$

$$t_{al} = F(Q, m, D, n, t_0), \text{ [min]}, \quad (14)$$

ahol:

Q – a görgőjáratra finomórlésre egyszerre feladott anyag ásványi és kémiai összetétele (ez lehet 1-1 konkrét anyagtípus, vagy többféle anyagból készített keverék is);

m – az egy időben aprított anyag tömege, [kg];

D – a feladott anyag legnagyobb szemcsemérete, [mm];

n – a görgőjárat királytengelyének fordulatszáma, [1/min];

t_0 – a görgőn előre beállított névleges résméret, [mm].

Fenti független változók (faktorok) a kísérlettervnek megfelelően változtathatóak egyidejűleg vagy külön-külön.

A mechanokémiai jelenségek tanulmányozásához és vizsgálatához célszerű a görgőjárat aprítózónájából 5 percnként mintát venni, majd a vett mintákról SEM-felvételt

készíteni. A SEM-felvétel (4. ábra) segítségével jól meghatározható a mechanokémiai jelenség típusa, valamint az aggregáció, illetve agglomeráció jellege és mértéke.

4. Görgőjáratok (kollerek) technológiai szemléletű méretezése – a keverő- és homogenizáló hatás mértékének matematikai meghatározása

4.1. A vizsgálati modell megválasztása

A technológiai szemléletű aprításelméletek lényege, hogy egyaránt figyelembe veszik az aprítandó anyag olyan fiziko-mechanikai tulajdonságait, mint a reológiai anyag-egyenlet, vagy a külső és belső súrlódási együttható, valamint az aprítógép (örlőberendezés) geometriai és műszaki, technológiai paramétereit.

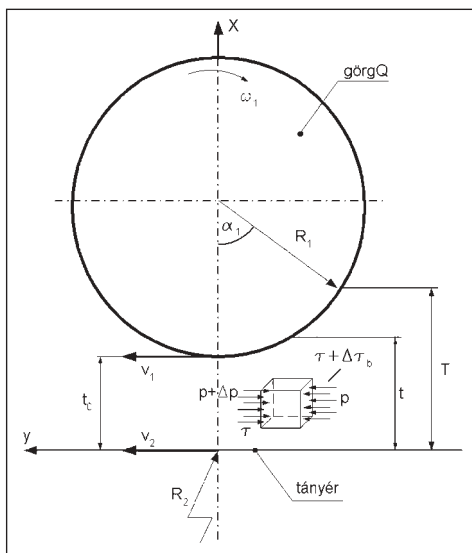
Esetünkben az aprítandó anyag képlékeny viszkorugalmas, bányanedves agyagásvány, amelynek reológiai tulajdonságai jó megközelítéssel leírhatók a Bingham-féle anyagegyenlettel:

$$\tau = \tau_0 + \eta \frac{du}{dx}, [\text{MPa}]. \quad (15)$$

Tekintettel arra, hogy a görgőjáraton az aprítás az R_1 sugarú görgő szemcsén történő átgördülése során megy végbe, a berendezés felfogható olyan „hengerpárként”, ahol a másik „henger” az örlőtányér, amelynek sugara R_2 végtelen nagy, vagyis:

$$R_2 = \infty, [\text{m}]. \quad (16)$$

A görgőjáraton történő aprítás során lejátszódó fizikai, mechanikai és technológiai folyamatok matematikai elemzéséhez – levezetéséhez – célszerű olyan koordiná-



5. ábra. A megválasztott modell görgőjáratok (kollerek) méretezéséhez

ta-rendszert választani, amelynek középpontja a mindenkor görgőközépponthoz képest rögzített, azaz a koordináta-rendszer a királytengely fordulatszámával forog. Ebből a koordináta-rendszerből nézve a görgő csak a tengelye körül végez forgómozgást, míg a tányér egy olyan végtelenül nagy sugarú henger, amelynek „kerületi sebessége” megegyezik a görgő kerületi sebességével (5. ábra), mivel a koordináta-rendszer a görgő kerületi sebességével elhalad a tányérra felett.

Az általunk választott modell fontos eleme, hogy a görgő és a tányér közötti résben aprítandó anyag elemi térfogata mechanikailag (erőtani szempontból) mindenkor egyensúlyi állapotban van. Az egyensúlyi állapotot leíró egyenleteket az általunk használt koordináta-rendszerben felírva, majd megoldva adódik, hogy:

$$\frac{dp}{dy} = \frac{d\tau}{dx}. \quad (17)$$

4.2. A görgő és a tányér közötti résben található aprózó masszában kialakuló sebességviszonyok

A kollerjáratok méretezésekor a görgő és a tányér közötti résben található bányanedves agyagásványban aprítás közben kialakuló áramlási és deformációs sebességviszonyok meghatározásához célszerű a csúszatófeszültséget leíró (15) kifejezést behelyettesíteni a mechanikai egyensúlyi állapotot leíró (17) összefüggésbe. Ekkor:

$$\frac{dp}{dy} = \frac{d}{dx} \left(\tau_0 + \eta \frac{du}{dx} \right) [\text{Pa/m}], \quad (18)$$

ahonnan a szemcse résben elfoglalt helyzetétől függő áramlási és deformációs sebességviszonyokra kettős integrálás után kapjuk az:

$$u = \frac{1}{\eta} \left(-\tau_0 x + C_1 x + \frac{dp}{dy} \frac{x^2}{2} + C_2 \right), [\text{m/s}] \quad (19)$$

összefüggést.

A C_1 és C_2 integrálási állandók a görgőjárat műszaki paramétereiből és az alkalmazott modelltől (koordináta-rendszerből) kiindulva (5. ábra) az:

$$u = v, \text{ ha } x = 0 \text{ és } u = v, \text{ ha } x = t \quad (20)$$

peremfeltételekből határozhatók meg.

A (20) peremfeltételek (19) kifejezésbe történő behelyettesítése és a megfelelő rendezések után az integrálási állandókra a következő összefüggések adódnak:

$$C_1 = \tau_0 - \frac{t}{2} \frac{dp}{dy}, \quad (21)$$

$$C_2 = \eta \cdot v = \eta (\omega_1 R_1). \quad (22)$$

A (21) és (22) kifejezéseket a (19) összefüggésbe beírva az összevonások után a görgőjárat (koller) részében aprózó masszában kialakuló áramlási és deformációs sebességviszonyokra az alábbi egyenlet adódik:

$$u = \frac{1}{2\eta} \left(\frac{dp}{dy} x^2 - \frac{dp}{dy} t_0 x + 2\eta\omega_1 R_1 \right), [\text{m/s}]. \quad (23)$$

A (23) összefüggésben szereplő dp/dy differenciálhányados a görgőjárat (koller) átbocsátási teljesítményéből lehet meghatározni a következők szerint:

$$V_1 = \int_0^t u \cdot L \cdot dx, [\text{m}^3/\text{s}], \quad (24)$$

ahol:

V_1 – az időegységre jutó megmunkált agyagmassza térfogata a tetszőlegesen megválasztott „ t ” vastagságú résszelvénynél, $[\text{m}^3/\text{s}]$;

L – a görgőpalást szélessége, $[\text{m}]$;

U – az aprítandó massa áramlási sebessége t résszelvénynél, $[\text{m/s}]$.

A (23) kifejezés (24)-be történő behelyettesítése és az integrálás elvégzése után a görgőjárat (koller) időegységre jutó átbocsátási teljesítménye:

$$V_1 = \omega_1 L R_1 t - \frac{L}{12\eta} \frac{dp}{dy} t^3, [\text{m}^3/\text{s}]. \quad (25)$$

Ugyanakkor a t_0 résméretnél (5. ábra) a görgőjárat (koller) időegységre jutó átbocsátási teljesítménye meghatározható a

$$V_2 = L \cdot t_0 \cdot R_1 \cdot \omega_1, [\text{m}^3/\text{s}] \quad (26)$$

összefüggés alapján is.

Mivel a görgőjárat átbocsátási-átgyúrási teljesítménye a rés bármely metszetében azonos, következik, hogy:

$$\omega_1 L R_1 t - \frac{L}{12\eta} \frac{dp}{dy} t^3 = \omega_1 L R_1 t_0, [\text{m}^3/\text{s}], \quad (27)$$

ahonnan:

$$\frac{dp}{dy} = \frac{12\eta\omega_1 R_1}{t^3} (t - t_0), [\text{Pa/m}]. \quad (28)$$

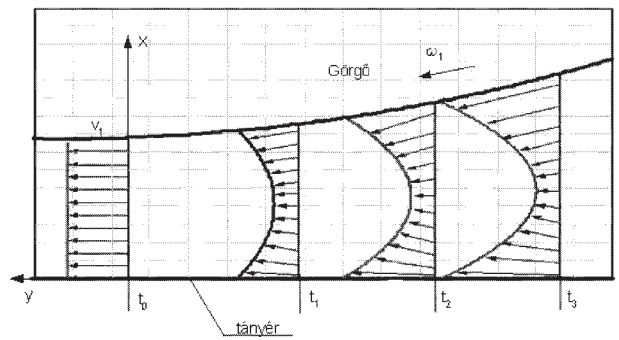
A (28) kifejezést a (23) kifejezésbe visszahelyettesítve, az összevonások után a görgőjárat (koller) részében aprózódó masszában kialakuló áramlási és deformációs sebességviszonyokat az alábbi matematikai összefüggéssel írhatjuk le:

$$u = \frac{6\omega_1 R_1}{t^3} (t - t_0) (x^2 - tx) + \omega_1 R_1, [\text{m/s}], \quad (29)$$

ahol t értéke a t_0 névleges résmérettől (az átgyúrási utáni „anyagszalag” vastagságától) a görgőjáratra feladott anyag területi magasságáig, de legfeljebb a külső súrlódási együtthatóból származó behúzási szöghöz tartozó T résméretig változhat. Vagyis:

$$t_0 \leq t \leq T, [\text{m}]. \quad (30)$$

A (29) összefüggés jól szemlélteti, hogy a görgőjáratok (kollerek) görgői alatti résben aprózódó anyagban kialakuló áramlási és deformációs sebességviszonyok függetlenek az aprítandó anyag olyan fizikai és mechanikai tulajdonságaitól, mint például a kristályszerkezet, viszkozitás,

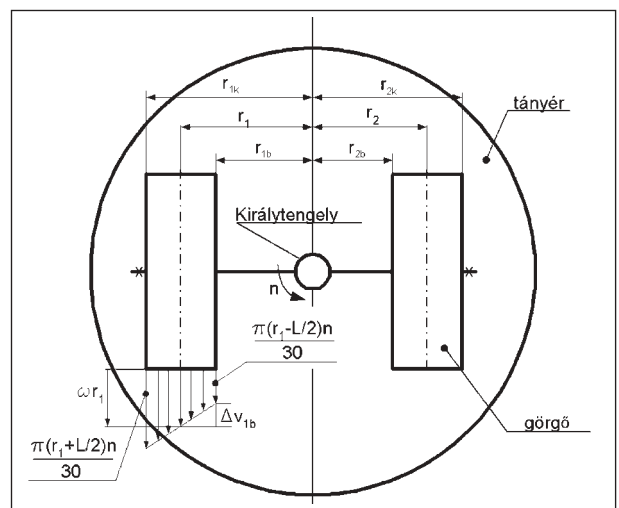


6. ábra. A (29) kifejezés alapján számított áramlási és deformációs sebességviszonyok alakulása az aprítandó anyagban a görgő és a tányér közötti résen történő átgyúrása közben

nyomó- vagy hajlítószilárdság. Ugyanakkor ezek az áramlási és deformációs sebességviszonyok alapvetően függenek a görgők geometriai méretétől (R_1) és technológiai paramétereitől (ω_1 és t_0), valamint az egyszerre feladott anyagok mennyiségétől („ T ” területi magasságától), illetve a résben elfoglalt geometriai helyzetétől.

A 6. ábra azt szemlélteti, milyen áramlási, keveredési viszonyok alakulnak ki a görgőjáratokon (kollereken) aprított anyagokban a görgők alatti résben elfoglalt pillanatnyi helyzetüktől függően. Az ábra jól szemlélteti azt a technológiailag rendkívül fontos és jelentős keverő- és homogenizáló hatást, aminek minden anyag ki van téve a görgőjáratokon történő aprítás során.

A (29) összefüggés alapján készített 6. ábra választ ad arra a kérdésre is, miért lehet ezeket az aprítógepeket az őrlés mellett vagy helyett sok esetben keverőként (például laboratóriumi homokkeverő) vagy homogenizálóberendezésként használni. Könnyű belátni, hogy az a keverő- és homogenizáló hatás még jelentősebb, ha figyelembe vesszük, hogy a (29) kifejezés csupán az n fordulatszámmal forgó királytengelytől (7. ábra) az L_1 szélességű görgőpalást alkotóját r_1 távolságban középen metsző síkra igaz.



7. ábra. A görgők palástfelülete csúszásának értelmezése

Valójában a királytengely körüli forgás következtében az L_1 szélességű görgő palástfelületének belső szélén a kerületi sebesség:

$$v_{1b} = \frac{\pi \cdot n \cdot r_{1b}}{30}, [\text{m/s}], \quad (31)$$

közepén:

$$v_1 = \frac{\pi \cdot n \cdot r_1}{30} = \omega_1 \cdot R_1, [\text{m/s}], \quad (32)$$

külső szélén:

$$v_{1k} = \frac{\pi \cdot n \cdot r_{1k}}{30}, [\text{m/s}]. \quad (33)$$

Ez azt jelenti, hogy az aprítandó szemcséken

$$v_1 = \omega_1 \cdot R_1, [\text{m/s}] \quad (34)$$

kerületi sebességgel átgördülő L_1 szélességű görgő palástfelülete a királytengely felőli oldalon, a királytengely által gerjesztett sebességhez képest:

$$\Delta v_{1b} = v_1 - v_{1b} = \frac{\pi \cdot L_i \cdot n}{60}, [\text{m/s}] \quad (35)$$

sebességgel siet, míg a külső oldalán:

$$\Delta v_{1k} = v_1 - v_{1k} = -\frac{\pi \cdot L_i \cdot n}{60}, [\text{m/s}] \quad (36)$$

sebességgel késik. Ez egyben azt is jelenti, hogy aprítás közben a kollerjáratok görgői a görgőpalástok alkotóját középen metsző siktól távolodva mindkét irányban növekvő mértékben csúsznak az aprítandó anyag felületén, ezzel is elősegítve jelentős csúsztató- (nyíró-) feszültség keletkezését az aprítandó anyagban.

Az L_1 szélességű, R_1 sugarú és ω_1 szögsebességű görgő palástfelülete aprítandó anyagon történő megcsúszásának átlagsebessége a

$$v_{1ac} = \frac{\pi L_1 n}{120}, [\text{m/s}] \quad (37)$$

összefüggés alapján számítható. Amennyiben a görgőjáraton az aprítást N számú azonos átmérőjű, de különböző szélességű görgő végzi, úgy a tetszőlegesen választott i -edik görgő palástfelülete megcsúszásának átlagsebessége:

$$v_{iac} = \frac{\pi L_i n}{120}, [\text{m/s}], \quad (38)$$

ahol: n – a királytengely fordulatszáma, $[\text{min}^{-1}]$.

5. Görgőjáratokon történő aprítás energiaigénye

A technológiailag hasznos energiaigény az alábbi összefüggés szerint határozható meg:

$$W_{\text{tech}} = W_R + W_\tau, [\text{Nm}], \quad (39)$$

ahol:

W_R – az adott rugalmassági modulusú, nyomószilárd-ságú és viszkozitású anyag aprításához szükséges nyomófeszültség előállításához és fenntartásához szükséges energiaigény, $[\text{Nm}]$;

W_τ – ugyanezen anyagban a görgő és a tányér közötti résen történő áthaladáskor ébredő, az aprítást elősegítő csúsztatófeszültség előállításához és fenntartásához szükséges energiaigény, $[\text{Nm}]$.

A Bingham-féle anyagok aprítása esetén könnyű belátni – a (15) reomechanikai anyagegyenletből következik –, hogy a W_τ biztosítja a szemcsés anyagok görgőjáratokon történő aprításakor megfigyelhető intenzív keveredést, homogenizálódást is!

A görgőjárat mozgó egységeinek mozgatásához szükséges, az aprítógép konstrukciós kialakításától függő „hasznos” energiaigény pedig:

$$W_{KH} = W_{gm} + W_{gc} + W_{ka} + W_{kt}, [\text{Nm}] \quad (40)$$

összefüggés alapján határozható meg, ahol:

W_{gm} – a görgők mozgatásához (a gördülő-ellenállás leküzdéséhez) szükséges energiaigény, $[\text{Nm}]$;

W_{gc} – az aprított anyag és a görgő palástfelülete között ébredő külső súrlódási együttható leküzdéséhez szükséges energiaigény, amikor a görgőpalást az aprítandó anyag felületén v_{iac} átlagsebességgel – (38) kifejezés – csúszik, $[\text{Nm}]$;

W_{ka} – a terelő és az aprítandó anyag felülete között ébredő súrlódóerő leküzdéséhez szükséges energiaigény, $[\text{Nm}]$;

W_{kt} – a terelő és a tányér felülete között ébredő súrlódóerő leküzdéséhez szükséges energiaigény, $[\text{Nm}]$.

Egy adott fizikai, mechanikai és reológiai tulajdonságú anyag aprítására akkor alkalmas egy görgőjárat (koller) mint aprítógép, ha mindenkor fennáll a

$$W_{KH} \geq W_{\text{tech}} \quad (42)$$

összefüggés.

Amennyiben a (42) kifejezés által megkövetelt feltételek nem teljesülnek, akkor szükségessé válik a görgők tömegének vagy a királytengely fordulatszámának – vagy egyidejűleg mindkettőnek – a növelése.

Mind a technológiai energiaigény (W_{tech}), mind a görgőjárat (koller) konstrukciós kialakításától függő hasznos energiaigény (W_{KH}) matematikailag levezethető és meghatározható. Tekintettel arra, hogy a levezetések meglehetősen bonyolultak és sok-sok lépésből állnak, ezért célszerű ezeket az energiaigényeket önálló tanulmányban – tudományos cikkben – közölni.

6. Eredmények összegzése

A fentebb leírtakat összefoglalva megállapítható: az aprítási elméletek a klasszikus mechanikai szemléletű elméletektől

a mechanokémiai és a technológiai szemléletű megközelítésig mind a mai napig fejlődnek; aprított anyag, illetve aprítóberendezés specifikusan továbbfejleszthetők. Napjainkban egy aprítási feladat csak úgy oldható meg hatékonyan, ha egyaránt figyelembe vesszük az aprítódó anyagban aprítás közben lejátszódó fizikai, kémiai, morfológiai, mechanikai és reológiai változásokat, valamint a kiválasztott aprítógép által biztosított technológiai lehetőségeket.

A Kerámia- és Szilikátmérnöki Tanszéken (Miskolci Egyetem) rendelkezésre álló laboratóriumi kollerjáraton a berendezés technológiai adottságainak kihasználásával sikerült mechanokémiai jelenségek tanulmányozására alkalmas finomságú, szemcseméretű mészkölsziet előállítani. Egyben igazoltuk, hogy a mechanokémiai szempontból oly fontos aggregáció és agglomeráció kezdetének meghatározására – az ehhez tartozó anyagspecifikus szemcseméret és őrlésidő megállapítására – az egyébként durvaaprításra szolgáló görgőjáratok is alkalmasak. Sőt, a (13) és (14) kifejezések szerinti komplex vizsgálatok is elvégezhetőek görgőjáratok (kollerek) segítségével.

Az olyan Bingham-féle reológiai anyagegyenletekkel jellemezhető anyagok, mint a bányanedves agyagásványok példáján sikerült matematikailag levezetni – és ezáltal egzakt módon meghatározni – a kollerjáratok görgői alatt a görgő és a tányér közötti résen átgyűrődő, aprózódó anyagban kialakuló áramlási és deformációs sebességviszonyokat leíró (29) egyenletet. A (29) kifejezés jól tükrözi, hogy a görgők alatti résben aprítódó anyagban az egymás mellett elhelyezkedő rétegek sebességkülönbsége miatt milyen intenzív – technológiailag egyébként nagyon hasznos – keveredés és homogenizáció játszódik le.

Hasonlóan teljesen új megközelítésben sikerült megfogalmazni a görgőjáratokon (kollereken) történő aprítás technológiailag szükséges (hasznos) energiaigényét is a (39) összefüggésben. Azonban az adott rugalmassági modulusú, nyomószilárdságú és viszkozitású anyag görgőjáraton történő aprításához szükséges nyomófeszültség és csúszatófeszültség előállításához szükséges W_R és W_T energiaigény matematikai levezetése meglehetősen bonyolult és sok-sok lépésből áll, ezért célszerű azt a későbbiekben önálló publikáció formájában megjelentetni.

Irodalom

- [1] Dr. Verő József: Fémtan. Tankönyvkiadó, 1969. 102–103. old.
- [2] Budnikov P. P. – Balkevics V. L. és mások: Himitseskaya tehnologiya keramiki i ognenporov. Moszkva, 1972. 123–129. old.
- [3] Dr. Palotás László: Általános anyagismeret. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1979. 132–136. old.
- [4] Dr. Antal Boza József – Lorencz Sándor: Szilikátkémia és technológia. Tankönyvkiadó, Budapest, 1979. 26–30. old.
- [5] Dr. Gömze A. László: Portechnológiák. Miskolci Egyetem, Anyag- és Kohómérnöki Kar, anyagmérnök szak, III. évf. 2. és 3. előadás kiadott jegyzete. „APRÍTÁS-ŐRLÉS” (kézirat), Miskolc, 2003.
- [6] Dr. Gömze A. László: Kerámia- és kompozittechnológiák I. Miskolci Egyetem, Anyag- és Kohómérnöki Kar, anyagtechnológiai szakirány, IV. évf. 9. előadás kiadott jegyzete. „KERÁMIÁK ÉS KOMPOZITOK SZINTERELÉSE – SZILÁRD FÁZISÚ REAKCIÓK”. Miskolc, 2002.
- [7] Rittinger, P. Ritter von: Lehrbuch der Aufbereitungskunde, Berlin, Verlag Ernst und Korn, 1867.
- [8] Szapoznyikov M. Ya.: Mechanicseskoe oborudovanie predpriyatij sztroitel'nyh materialov, izdelij i konsztrukcij. Izdatel'sztvo Vüszsaya Skola, Moszkva, 1971. 16. old.
- [9] F. Kick: Das Gesetz der proportionellen Widerstände und seine Anwendungen. Leipzig, Verlag von Arthur Felix, 1885.
- [10] Bond F. C.: The third theory of comminution. Mining Engineering, 4. p. 484–494. 1952.
- [11] Charles R. J.: Energy – size reduction relationships in comminution. Mining Engineering, 9. p. 80–88. 1957.
- [12] Péter Gyula: Kerámiaipari gépek. Műszaki Könyvkiadó, Bp., 1982.
- [13] Szilenok Sz. G.: Mechanicseskoe oborudovanie predpriyatij sztroitel'noj industrii. Sztrojizdat, Moszkva, 1973.
- [14] Baumann V. A. – Kusancev, B. V. – Martüov, V. D.: Mechanicseskoe oborudovanie predpriyatij sztroitel'nyh materialov, izdelij i konsztrukcij. Moszkva, Masinosztroenie, 1981.
- [15] Martüinov, V. D. – Szergeev, V. P.: Sztroitel'nyie masinu. Moszkva, Vüszsaya Skola, 1970.
- [16] Duderov G. N.: Praktikum po tehnologii keramiki i ogneporov. Moszkva, Promsztrojizdat, 1953.
- [17] Pololuboyarinov D. N. – Balkevics V. L. – Popil'szkij R. Ya.: Vüszokoglinozemisztüie keramicseszküie i ognenpornüie materialü. Moszkva, Gosztrojizdat, 1960.
- [18] Nyicsiporenko Sz. P.: Fiziko-himicseszkaya mehanika diszpersznüih sztruktur tehnologii sztroitel'noj keramiki. Kiev, Naukova dumka, 1968.
- [19] Budnikov P. P. – Ginsztling A. M.: Reakciya v szmeszjah tvjordüh veshesztv. Moszkva, Sztrojizdat, 1971.
- [20] Juhász A. Zoltán: A mechanokémia alapjai. Egyetemi jegyzet. Veszprém, 1982.
- [21] Juhász A. Zoltán – Opczky Ludmilla: Mechanical Activation of Minerals by Grinding, Pulverizing and Morphology of Particles. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1990.
- [22] Juhász A. Zoltán: Mechanokémia és agglomeráció. Előadás, elhangzott MTA olvasótermében, Budapest, 2003. ápr. 16.
- [23] Opczky Ludmilla: Cementőrlés folyamatának tanulmányozása és intenzifikálása. Bp., 1968.
- [24] Opczky Ludmilla: Powder Technology. 17. p. 1–7. 1977.
- [25] Opczky Ludmilla – Mrákovicsné Török Katalin: Együtt és külön-örlés kérdései a kohósalakcement gyártásánál. Építőanyag. XXXII. évf. 11. sz. 401–406. old. 1980.
- [26] Gömze A. László: Iszledovanie processza tonkogo pomola glinyannüih massz na gladkih val'cah. I. díjas TDK-dolgozat (témavezető Turenko A. V.). Moszkva, 1972.
- [27] László Gömze A.: Osznovüi metodiki raszesota i szoversensztvovanie konsztrukcii valkovüh droblik gladkami val'cami. Diplomaterv (témavezető: Turenko A. V.). Moszkva, 1973.
- [28] Zolotarszkij A. Z.: Optimal'naya mocsnoszt' val'cov tonkogo pomola; Sztortel'nyie materialü. No. 5. 30–32. old. 1972.
- [29] Gömze A. László – Turenko A. V. – Nazarov A.: A képlekeny agyag aprításának matematikai elemzése. Építőanyag. 1974. 9. sz. 348–354. old.
- [30] Gömze A. László: Kerámiaipari simahengerművek törés elleni védelme. GTE-kiadvány. Miskolc, 1978. 165–170. old.
- [31] Gömze A. László: Az anyagfeladás egyenetlenségének hatása kerámiaipari simahengerművek dinamikai igénybevételére. GTE-kiadvány. Miskolc, 1979. 456–458. old.
- [32] Gömze A. László: Kerámiaipari simahengerművek hatékonyságnövelésének matematikai alapjai I., II., III. Építőanyag. 1980. 4., 9. és 10. szám.
- [33] Gömze A. László: Az üveg hengerlésének néhány elméleti kérdése a feldolgozandó üveglvadék fiziko-mechanikai tulajdonságainak figyelembevételével. Kézirat. Miskolc, NME, 1980. 1–49. old.
- [34] Gömze A. László – Csirszkó A. Sz. – Szilenok Sz. G. – Turenko A. V.: Anyagok reakciója és áramlási viszonyai simahengerekkel végzett aprításkor. Építőanyag. XXXIII. évf. 12. sz. 441–446. old. 1981.
- [35] Gömze A. László: Agyagásványok aprítására használt simahengerek méretezésének néhány specifikus problémája. Építőanyag. XXXII. évf. 11. sz. 428–432. old. 1980.

SZILIKÁTTECHNIKA

Feszültségmérési módszerek alkalmazása az üvegyártásban*

Horváth István – Szabó István

Veszprémi Egyetem

Bevezetés

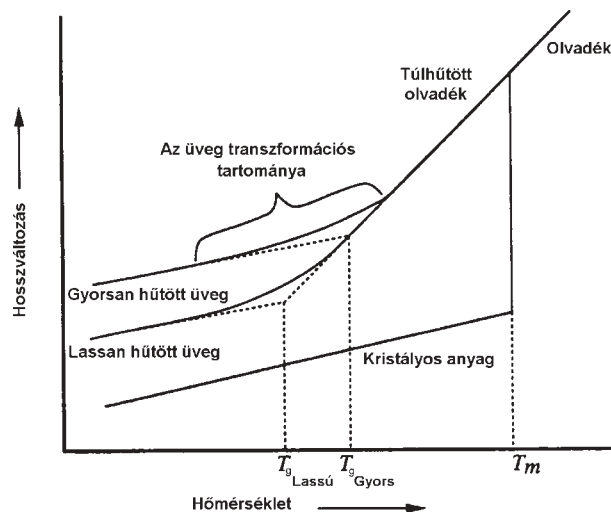
Az üvegyiparban gyártott termékek az üvegolvadék hűtésével, formázásával nyerik el végső alakjukat. A gyors hűtés eredményeként az üvegben termikus feszültségek keletkeznek, amelyek hatása befolyásolja az üvegtermékek mechanikai tulajdonságait (rugalmasság, szilárdság, feszültség, keménység), így általában a formázási eljárás befejezésekként a terméket feszültségmentesítik [1, 2]. Az üveg további megmunkálása, formázása, ragasztása, edzése az üvegben újabb feszültséget eredményez, amelynek ellenőrzése, kézbe tartása fontos üvegyártás-technológiai követelmény.

A feszültség, azaz a felületegységre ható erő – függetlenül attól, hogy termikus vagy kémiai inhomogenitás eredménye – az üveg transzformációs tartománya alatti rugalmas, elasztikus vagy transzformációs, viszkoelasztikus tartományában jöhet létre. Az üvegben keletkező feszültség lehet átmeneti vagy maradó. Az átmeneti feszültségek létrejöhetnek külső mechanikai terhelés vagy hőmérséklet-inhomogenitás következtében. A maradó feszültségek körébe sorolhatók az utólagos hőkezeléssel megszüntethető, valamint a nem megszüntethető feszültségek. Ez utóbbi csoportba tartoznak az eltérő kémiai összetételből eredő, illetve különböző összetételű üvegek vagy azok fémmel, kerámiával való összeolvasztásakor létrejövő feszültségek [3].

Az üveg szilárdságának növelése érdekében létrehozott feszültség előnyös [4]. Az üveg szilárdságnövelésének három ismertebb módja a termikus, a kémiai és a szálerősítési eljárás [5]. Ezek közül a cikk csak a termikus úton létrehozott feszültségekkel és azok mérésével foglalkozik.

Az üvegtulajdonságok és a feszültség kapcsolata

A feszültségek kialakulásakor a fizikai tulajdonságok közül a viszkozitás, a hőtágulás, a rugalmasság és a hővezetés játszik fontos szerepet.



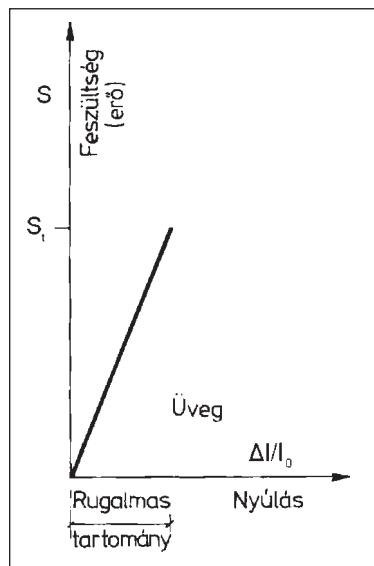
1. ábra. Az üveg dilatációs görbéje

Az olvadék hűtésekor a transzformációs hőmérséklet-tartomány feletti viszkozus állapotban feszültségek nem keletkezhetnek. Az üvegolvadék részecskéinek homogénitása nem teszi lehetővé feszültség kialakulását (1. ábra). A hőmérséklet csökkenésével növekszik az olvadék viszkozitása. Elérve a felső hűtési pontnak (annealing point) megfelelő hőmérsékletet, azaz az $\eta \sim 10^{13}$ dPas viszkozitást, az üvegben kialakul a viszkoelasztikus állapot. A hőmérséklet további csökkentésével elérhető az $\eta \sim 3,2 \times 10^{14}$ dPas viszkozitás, amely az alsó hűtési pontnak (strain point) felel meg. A viszkoelasztikus tartományban az üvegnek mind a viszkozus, mind a rugalmas jellemzői érvényesülnek, így lehetőség van feszültség kialakulására. Az üveg viszkozitása szobahőmérsékleten elérheti az $\eta \sim 10^{20}$ dPas értéket, az üveg gyakorlatilag szilárd.

A szilárd üveg erő hatására deformálódik. Az erő megszűnésével az üveg visszanyeri eredeti alakját, tehát ideálisan rugalmas tulajdonságokat mutat. A Hook-törvény szerint az alakváltozás vagy deformáció (D) arányos a terhelés hatására fellépő feszültséggel (S).

$$S = M \cdot D \quad (1)$$

* A 2003. június 3-án Budapesten rendezett Üvegyipari Konferencián elhangzott előadás nyomán



2. ábra. Az üveg alakváltozása és a külső erő hatására ébredő feszültség összefüggése [4]

Az egyenletben az M arányossági tényező az üveg kémiai összetételétől függő modulus. Húzófeszültség hatására kialakuló megnyúlás mértéke a tágulási vagy rugalmassági modulussal (E) jellemezhető (2. ábra). Az üveg rugalmassági modulusa 75 000 MPa. Az üveg törésig ideálisan rugalmas testként működik [4].

Az üveg mérete a hőmérséklet növekedésével növekszik. A dilatációs mérés segítségével a közepes lineáris hőtágulási együttható [6] és a transzformációs hőmérséklet [7] meghatározható.

Ha egy üveglapnak csak az egyik felét melegítjük, és a melegítés alatt az üveg hőmérséklete sehol sem éri el a transzformációs tartományt, a melegített rész igyekszik tágulni, a hideg rész azonban gátolja ebben. A melegített részben nyomó-, a hidegebb részben húzófeszültségek ébrednek. Az egész üvegmintát azonos hőmérsékletre melegítve a keletkezett átmeneti feszültségek megszűnnek.

Az üvegminta mérete a transzformációs tartományban ugrásszerűen megnő, jelezve, hogy ebben a hőmérséklet-tartományban alapvető szerkezeti átalakulás megy végbe. A méretnövekedés az eltérő hőmérsékletű üvegrészekben különböző, közöttük átmeneti termikus feszültségek ébrednek. Üvegcsövek darabolásának egyik módja, hogy a csövet forgás közben izzó huzallal vagy hegyes lánggal vékony sávban felmelegítik, majd hideg fémkoronggal megérintik. Az üvegcső külső rétege az érintés vonalában hirtelen lehül, és a keletkező axiális húzófeszültség hatására az üvegcső körbeped. A transzformációs tartomány fölötti hőmérsékleten a repesztés nem sikerül.

A transzformációs tartomány felett kialakuló hőmérséklet-különbségek maradó feszültséget keltenek, megszüntetésük csak utólagos hőkezeléssel oldható meg. A transzformációs tartomány hőmérséklete fölül melegített

üvegrész a vele szomszédos, viszonylag hidegebb üvegrészhez képest nagyobb mértékben húzódik össze hűlés hatására. A felső hűtési pontnál nagyobb hőmérsékletéről hűlő üvegrészt a hidegebb üvegrész gátolja összehúzódásában. A mintának szobahőmérsékletre való teljes lehülése után a transzformációs tartománynál nagyobb hőmérsékletéről hűtött üvegrészben húzó-, míg a transzformációs tartományt el nem ért részben nyomófeszültség alakul ki.

Edzés során az üveg felületét a transzformációs tartomány fölül melegítik. A minta belsejének hőmérséklete ugyanakkor nem lépi túl a transzformációs hőmérsékletet az üveg alaktartásának biztosítása érdekében. Az előző esettől eltérő gyors hűtés a felületi réteg gyors összehúzódását eredményezi, amelyet a viszkoelasztikus belső réteg enged. Végül a szobahőmérsékletre lehűlt minta belsejében húzó-, felületén nyomófeszültség alakul ki.

Az üvegben a hőátadás vezetéssel és sugárral történik. Kis hőmérsékleten a vezetés, nagyobb hőmérsékleten a sugárzás jelentősebb. Definíció szerint a hővezetést a következő egyenlet írja le:

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda_t \cdot F \cdot \frac{dT}{dx}, \quad (2)$$

ahol

λ_t a hővezetési tényező, W/(m·K),

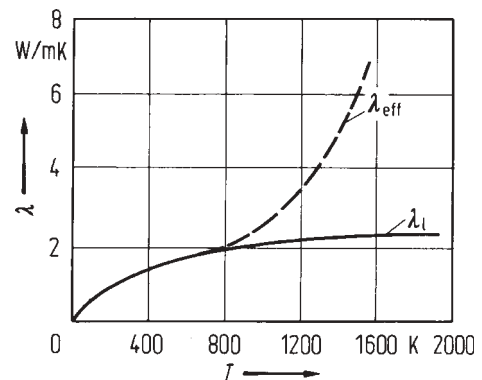
F a hőforgalom irányára merőleges felület,

$\frac{dQ}{dt}$ az időegység alatt az F felületen átadott hőmennyiség,

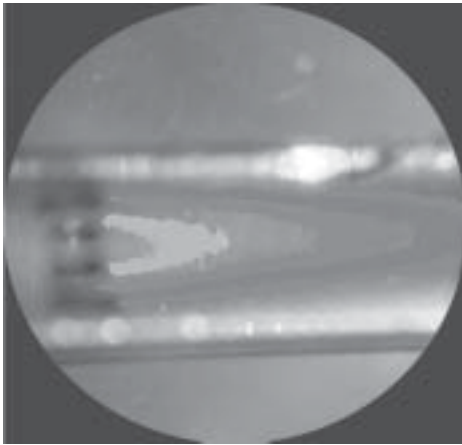
$\frac{dT}{dx}$ a hőmérséklet-gradiens.

Mérésnél az effektív hővezetési tényezővel (λ_{eff}) számolnak, amely a hővezetési tényező (λ_t) és a sugárzásos vezetési tényező (λ_{st}) összege.

Az effektív hővezetési tényezőt gyakran hővezető képességnek nevezik. Nagyobb hőmérsékleten a sugárral leadott hőmennyiség nagyságrenddel nagyobb a hővezetéssel leadott hőmennyiségnél [2]. Az üveg formázásánál vagy edzésénél a transzformációs tartományból vagy annál nagyobb hőmérsékletéről történő hűtésnél kezdetben



3. ábra. Az üveg effektív hővezetési tényezőjének változása a hőmérséklet függvényében ($T > T_g$ esetén $\lambda_{eff} = \lambda_t + \lambda_{st}$) [2]

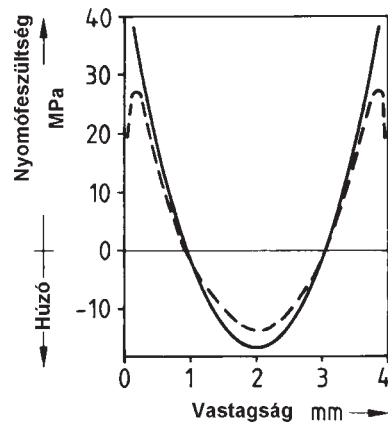


4. ábra. Az edzett üveg vastagságában fellépő parabolikus feszültségeloszlás

a sugárzás a döntő. Szobahőmérséklet felé haladva a hőmérséklet-gradiens csökken, így egyre inkább a hővezetés kerül előtérbe (3. ábra).

Az üveg termikus szilárdságnövelése hűtőlevegővel [8] vagy hűtőfolyadékkal [9] oldható meg. Az üveg felületi rétegében kialakuló nyomófeszültség összenyomja a felületi hibákat. Terhelés esetén a húzófeszültségnek elsőként a felületi nyomófeszültséget kell legyőznie, és csak a húzófeszültség további növekedése idézi elő az üveg törését. Állandó felületi nyomófeszültség kialakításához a hűtés a T_g hőmérséklet feletti T_0 hőmérsékletéről indul. Ha az üveg mindkét oldalán állandó a hűtés sebessége, az üveg keresztmetszete mentén parabolikus hőmérsékletprofil alakul ki (4. ábra). Mindaddig, amíg T_0 nagyobb, mint T_g , vagyis a viszkozitás kicsi, feszültség nem alakul ki. Amikor az üvegfelület T_a hőmérséklete T_g alá csökken, a felületi rétegek összehúzódnak. Ugyanakkor az üveg belső rétegeiben uralkodó T_i hőmérséklet még nagyobb T_g -nél, emiatt a feszültségprofil a megszilárdult külső réteg és a még viszkoelasztikus belső réteg között jön létre. A viszkoelasztikus T_g tartományban a megszilárdulás és a feszültségképző folyamat az idő, és ezzel együtt a hűtési sebesség függvénye. Utóbbit a feszültség-relaxációs idők eloszlásfüggvénye jellemzi. Ha a feszültségprofil kialakulásáról pontosabb képet akarunk kapni, figyelembe kell vennünk a T_g hőmérséklet-tartományban a viszkozitás, a sűrűség és a rugalmassági modulus szerkezetfüggő változását.

A gyors hűtéssel az üveg felületén létrehozott nyomófeszültség nem minden esetben akadályozza meg a felület sérüléséből adódó repedések tovaterjedését, növekedését. A felület alatti rétegben megfelelő hőkezeléssel kialakítható nyomófeszültség-maximum csökkentheti a hibahelyeken a húzóerő támadási felületét. Így, ha a nyomófeszültség-profilnak a felületi réteg alatt alakul ki maximuma, a repedés terjedése gátolt, a nyomófeszültség tartományban a repedés töve összenyomódik (5. ábra). Ilyen feszültségállapot inverz hőkezeléssel (a felületi nyomófeszültség csökkentése fémolvadékban tör-



5. ábra. A feszültség vastagság menti eloszlása optimális esetben (—) és nyomófeszültség-maximum kialakítása az üveg felületi rétegében (- -) [5]

tendő gyors hőkezeléssel) vagy a T_g hőmérséklet alatti felületi ioncserével hozható létre [10].

Fény-üveg kölcsönhatás

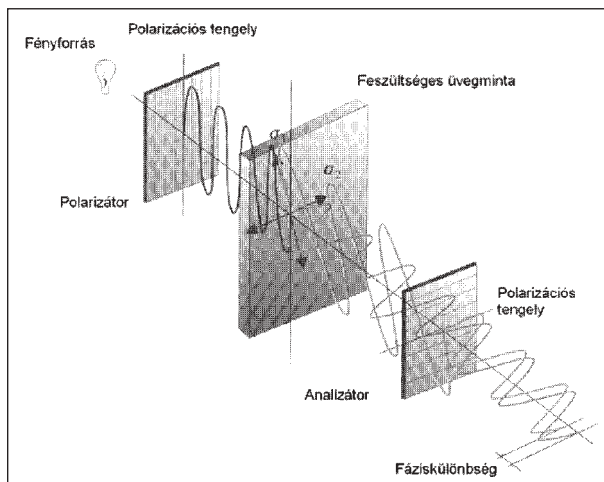
A feszültséganalízis optikai módszere, a fotoelasztikus analízis régóta ismert és alkalmazott technika. A fotoelasztikus eljárás olyan anyagokon végezhető, amelyek fényáteresztők és kettőtörők vagy kettőtörővé tehetők. A feszültséges üveg rendelkezik ezekkel a tulajdonságokkal, így ez a módszer alkalmas az üvegtermékekben jelen levő feszültségek meghatározására [11].

Síkpolárizáció

A fotoelasztikus eljárás alapja a síkpolárizáció, amelynek eredményeképpen a fény hullámkomponensei közül csak az egy síkban rezgő hullámok haladnak tovább. Síkpolárizációt úgy végezhetünk, hogy a fényt egy polarizáló lapon vezetjük keresztül. Az elem (*polarizátor*) olyan résnek tekinthető, amely csak a réssel párhuzamos irányú fényhullámokat engedi át. Ez az irány a *polarizációs irány*, tengelye a *polarizációs tengely*. Ha két polarizációs elemet keresztezett állásban helyezünk el egymás után, akkor az első elemet elhagyó polarizált fény nem jut át a második elemre. Ha a második polarizátort kis szögben ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$) elforgatjuk, több fény jut át a második elemre. A maximális áteresztés akkor tapasztalható, ha a két elem polarizációs tengelye egymással párhuzamos. Ezt a második polarizációs elemet *analizátornak* nevezik, mivel alkalmas az első elemből jövő és a mintán áthaladó polarizált fény rezgési síkjának meghatározására [11].

Kettős törés

Az izotróp anyagok, mint például az üvegek, feszültségmentes állapotban nem mutatnak optikai anizotrópiát vagy kettős törést. A feszültséges üvegbe lépő polarizált



6. ábra. A síkpolarizáló elvi vázlata, a kettőtörés kialakulása [11]

fénysugár két olyan, síkban polarizált sugárra válik szét, amelyek polarizációs iránya egymásra merőleges. Ezek a polarizációs irányok – az üvegbe történő belépésnél – a fő feszültségirányoknak felelnek meg. A két hullám különböző sebességgel halad a feszültséges üvegben, egymáshoz viszonyítva az egyik késik. A késés az anizotróp anyagból kilépő hullámok közötti úthosszkülönbséget, retardációt (δ) jelenti. Ez a jelenség a *kettős törés* (6. ábra). Kristályos kettőtörő anyagokban a szerkezettől függően egy vagy esetleg két irány található, amelyekben nem észlelhető kettős törés. Ez az irány az *optikai tengely*, a kristály fő szimmetriatengelye [12].

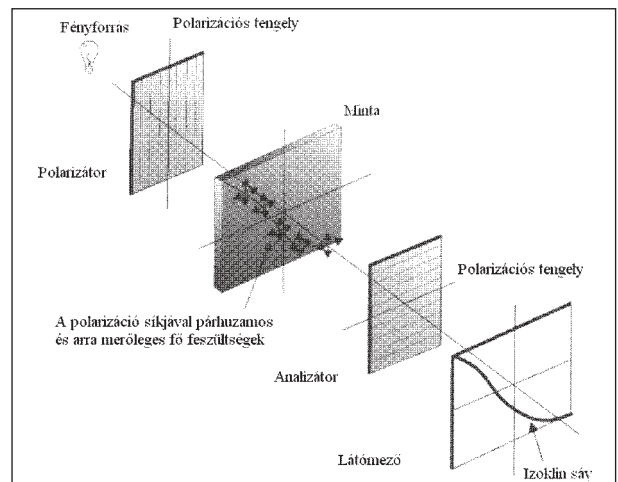
Ha a kettőtörő anyagot monokromatikus fényvel világítjuk meg, keresztezett polarizátorállás mellett két eltérő kioltási helyzet figyelhető meg: az izoklín és az izokróma sávok. Síkpolarizált fényben mindkét sáv típus észlelhető, ezzel szemben a körpolarizált fény esetén csak az izokróma sávok láthatók.

Izoklín sávok

Az izoklín sávok úgy definiálhatók, mint az üveg próbatess azon pontjainak összessége, amelyek fő feszültségirányai és nagyságai megegyeznek. Kialakulásuk azzal magyarázható, hogy a polarizátorból jövő, síkban polarizált fény olyan helyen halad át a feszültséges mintán, ahol a feszültség iránya és a polarizációsík párhuzamos egymással. Tehát nem alakul ki retardáció, a fény az eredeti polarizációs iránnyal lép ki a mintából, majd kioltódik a keresztezett állású analizátoron. Emiatt fekete sávot kapunk (7. ábra).

Izokróma sávok

Fehér fény alkalmazásakor a feszültségmentes helyeket jelölő izoklín sávok mellett színes sávok is láthatók a látómezőben. Az azonos színű sávok azon pontok összességének tekinthetők, amelyek fő feszültségei között a kü-



7. ábra. Az izoklín sávok kialakulása [11]

lönbségek azonosak. Ezek az ún. izokróma sávok. Monokromatikus fényforrást alkalmazva sárga és fekete sávokat látunk. Egy felületi feszültséges mintában, melyben a feszültség a felületen, a terület mentén változik, de a minta vastagságán keresztül nem, a feszültség és fény közötti kapcsolat a következő:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{N \cdot \lambda}{C \cdot s} \quad (3)$$

ahol

$(\sigma_1 - \sigma_2)$ a területi főfeszültségek közötti különbség, N az izokromatikus sáv rendje, λ az alkalmazott fény hullámhossza, C a feszültségoptikai együttható, s a minta vastagsága.

Üvegtermékekben, a szabad éleket leszámítva, ez az összefüggés nem érvényes, mivel az üveggyártás során alkalmazott hőkezelés eredményeképpen a feszültség a vastagság mentén is változik (parabola szerint). Ennek megfelelően a fenti egyenlet a következőképpen módosítandó:

$$\int_0^s (\sigma_1 - \sigma_2) ds = \frac{N\lambda}{C} \quad (4)$$

$$\int_0^s \sigma_1 ds - \int_0^s \sigma_2 ds = \frac{N\lambda}{C} \quad (5)$$

A gyakorlatban C értékét Brewsterben adják meg ($1 \text{ Brewster} = 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N} = 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$). Így ha λ nm-ben és s mm-ben adott, akkor a feszültségkülönbség egysége a N/mm^2 (= MPa). Néhány üvegtípus feszültségoptikai állandóját mutatja az 1. táblázat.

A sötét látóterű, fehér fényvel megvilágított polariméterben (keresztelt állású polarizátor és analizátor) látható színeket a 2. táblázat mutatja. Ha a fehér fény eléri a 400 nm -es hullámhosszt, akkor ($400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$) már lesz elsőrendű komponense, amely nem jut át az analizátoron. Így ennek a színnek a kiegészítő, komplementer színe látható.

Az izokróm sávokat monokromatikus fényvel vizsgálva két különböző polariméter-állás lehetséges: sötét látóterű (keresztezett állású polarizátor és analizátor) és vi-

Feszültségmérési módszerek

Polariméterek

1. táblázat

Különböző üvegek feszültségoptikai együtthatói

| Üveg típusa | C, Brewster ($\lambda = 514,5$ nm) |
|-----------------|-------------------------------------|
| Ólomüveg | 0,84 |
| Báriumüveg | 1,73 |
| Kvarcüveg | 2,71 |
| Floatüveg | 2,72 |
| Borosilikátüveg | 2,93 |

lágos látóterű (párhuzamos állású polarizátor és analizátor). A sötét látóterű polariméterben az interferenciasávok teljes rendűek, azaz minden egyes sáv egy teljes főfeszültség-különbségnek felel meg, amely egy teljes hullámhossznak megfelelő retardációt okoz. A világos látóterű polarizátorban a sávok félrendűek ($N = 0,5; 1,5; 2,5, \dots$).

Fontos megjegyezni, hogy minden fotoelasztikus mérés főfeszültség-különbségeket szolgáltat, nem pedig önálló feszültségértékeket, hacsak nem tételezzük fel, hogy az egyik komponens értéke ismert vagy zérus, mint például szabad határfelületek esetén, szélvédők széleinél.

Legegyszerűbb fajtájuk fényforrást, polarizátort és analizátort, valamint a kettő közé helyezett vizsgálandó mintát tartalmaz. A fényforrásból jövő fényt egy lencsén szórják, majd polarizálják, a polarizált fény merőlegesen jut a minta felületére. A polariméterek típustól függően sík- vagy körpoláros fény előállítására alkalmasak.

A síkpolariméter fényforrásból, keresztezett állású polarizátorból és analizátorból áll. Ebben az elrendezésben mind az izokróm, mind az izoklin sávok láthatók. A körpolariméter annyiban különbözik az előzőtől, hogy a polarizátor és analizátor közé negyedhullámhossz lapo(ka)t helyeznek, és ennek eredményeképpen csak az izokróm sávok láthatók. Ha a retardáció értéke kicsi és emiatt nehezen mérhető, akkor célszerű kompenzátorokat használni.

Kompenzátorok

Ezeket az optikai eszközöket retardációk sorozatmérésére alkalmazzák. A kompenzátor retardációja a hossz mentén folyamatosan változik, ez megkönnyíti a vizsgált üveg retardációjának mérését. Több kompenzátortípus és megoldás létezik, a következőkben az üvegiparban használatos típusok kerülnek ismertetésre.

2. táblázat

Különböző retardációk esetén észlelhető színek

| Rend | Retardáció (nm) | Szín | Rend | Retardáció (nm) | Szín |
|-----------|-----------------|----------------------|------------|-----------------|--------------------|
| I | 0 | fekete | II | 845 | zöldessárga |
| | 40 | vasszürke | | 865 | sárgászöld |
| | 100 | levendulaszürke | | 910 | tiszta sárga |
| | 1608 | szürkéskék | | 950 | narancs |
| | 220 | szürke | | 1000 | élénk narancsvörös |
| | 235 | zöldesfehér | | 1100 | sötét ibolyavörös |
| | 260 | csaknem tiszta fehér | III | 1130 | világos ibolyakék |
| | 270 | sárgásfehér | | 1150 | indigókék |
| | 275 | halvány szalmasárga | | 1260 | zöldeskék |
| | 280 | szalmasárga | | 1335 | tengerzöld |
| | 305 | világossárga | | 1375 | ragyogózöld |
| | 330 | élénksárga | | 1425 | zöldessárga |
| | 430 | barnássárga | | 1495 | húsvörös |
| | 505 | vöröses narancs | | 1535 | kárminvörös |
| | 535 | vörös | | 1620 | fáradt bíbor |
| 550 | mélyvörös | 1650 | | szürkésibolya | |
| II | 565 | bíbor | IV | 1680 | szürkéskék |
| | 575 | ibolyakék | | 1710 | fáradt tengerzöld |
| | 590 | indigókék | | 1745 | kékeszöld |
| | 665 | égszínkék | | 1810 | világoszöld |
| | 730 | zöldeskék | | 1930 | enyhe zöldeskék |
| | 750 | zöld | | 2010 | szürkésfehér |
| | 825 | világoszöld | | 2050 | húsvörös |

A kompenzátorok legegyszerűbb formája egy műanyag ék. Az ék egy epoxigyantából készült egyenletes húzófeszültségű próbatest, vastagsága a hossz mentén változik. Csúcsánál a retardáció nulla, attól távolodva több rendűségig növekszik. Ezért ha az éket fehér, körpoláros fényel világítjuk meg a polariméterben, színes, párhuzamos sávokból álló sorozatok láthatók. A nullarendű sáv, amely mindig fekete, az ék csúcsánál helyezkedik el, míg az elsőrendű sáv a sötét-kék/sötétvörös sávhatáron található. A másodrendű sáv a sötétzöld/rózsaszín fázishatárnak felel meg. Ahogy a sáv rendje növekszik, a színek intenzitása egyre csökken, a fázishatár egyre nehezebben határozható meg. Monokromatikus fény alkalmazása mellett fekete sávok sorozata látható, ekkor a magasabb rendű sávok is könnyebben kivehetők.

A húzófeszültségű ékkompensátort leginkább a szabad élek retardációjának mérésére alkalmazzák. Mivel az élre merőleges fő feszültség törvényszerűen zérus, az ék alkalmas annak meghatározására, hogy az üveg élével párhuzamos, nem zérus feszültségek nyomó- vagy húzófeszültségek-e. Ez a mérés a következőképpen végezhető el:

1. az üvegmintát fehér fényű körpolariméterbe helyezik;
2. az éket az élre merőlegesen az üvegmintára teszik, majd fő tengelye mentén felváltva ki- és betolják;
3. ha az üvegminta élén fekete sáv jelenik meg, akkor az él húzófeszültséges.

Az üvegen és az éken áthaladó fényt mindkét elemben lévő feszültség befolyásolja.

Ha az élen kialakult feszültséget σ_w -vel, az éllel párhuzamos feszültséget σ_1 -gyel, az élre merőleges feszültséget σ_2 -vel jelöljük, az élre merőleges teljes feszültség: $(\sigma_2 + \sigma_w) = \sigma_w$, mivel $\sigma_2 = 0$. Ezért a (3) feszültségoptikai egyenletet alkalmazva kapjuk:

$$(\sigma_1 - \sigma_w) = \frac{N \cdot \lambda}{C \cdot s} \quad (6)$$

Mivel fekete sáv látható, N értéke nulla, ezért:

$$\sigma_1 = \sigma_w \quad (7)$$

A σ_w húzófeszültség, tehát σ_1 -nek is húzófeszültségnek kell lennie.

Ha a fekete sávok az előbbi módon nem észlelhetők, az éket az éllel párhuzamosan kell elhelyezni és a hossz-tengelye mentén mozgatni. Ha az üvegminta élén fekete sáv látható, akkor ott nyomófeszültség van. Ebben az esetben az éllel párhuzamos teljes feszültség $(\sigma_1 + \sigma_w)$, míg az élre merőleges feszültség $\sigma_2 = 0$. A (3) összefüggést felhasználva:

$$(\sigma_1 + \sigma_w) = \frac{N \cdot \lambda}{C \cdot s} \quad (8)$$

N értéke itt is nulla, ezért:

$$\sigma_1 = -\sigma_w \quad (9)$$

Mivel σ_w húzó-, a negatív előjel azt jelenti, hogy σ_1 nyomófeszültség kell, hogy legyen.

A sávrendet az éleken úgy határozzák meg, hogy az éket az előbb ismertetett módon az üvegre helyezik, és megfigyelik, hol jelenik meg a fekete sáv, amely a legközelebbi, legkisebb egész sávértéknek felel meg. A sáv rendjét úgy adják meg, hogy a legkisebb egész értékhez hozzáadják azt a törtértéket, amelyet a megállapított és a következő, nagyobb egész sáv közötti különbség ad meg.

Poliuretán négyzetkompensátor

Az előzőhöz hasonló elven működik, de fotoelasztikus szempontból sokkal érzékenyebb. Ha a síknégyzetre átlós irányban terhelést adnak, annak hatására abban nyomófeszültség alakul ki. A húzó- és nyomófeszültségnek megfelelő irányok ellentétesek azokkal, mint amelyek a húzófeszültségű ékkompensáció esetén tapasztalhatók.

A kompenzátorok egy továbbfejlesztett változata a Babinet és a Babinet-Soleil kompenzátor, amely két éket tartalmaz.

Teljes-hullámhossz lap

Ez az elrendezés kis értékű retardációknál hatékonyan alkalmazható. A teljes-hullámhossz lap vagy színezett lap egy egész hullámhossznak megfelelő fáziskülönbséget hoz létre a rajta áthaladó fényen. Ha egy teljes-hullámhossz lapot helyezünk a körpolarizátorba úgy, hogy az a polarizátor és az analizátor polarizációs tengelyével 45° -os szöveget zár be, az analizátor felől nézve bíborvörös képet kapunk. Ha a mintatartóba helyezzük a vizsgálandó üvegmintát, az analizátoron keresztül látható mező képe megváltozik.

Megfelelő gyakorlat birtokában a feszültségek húzó vagy nyomó jellege megállapítható a színváltozásból, amelyet a húzófeszültség esetén az eredő retardáció növekedése, a nyomófeszültség esetén annak csökkenése eredményez.

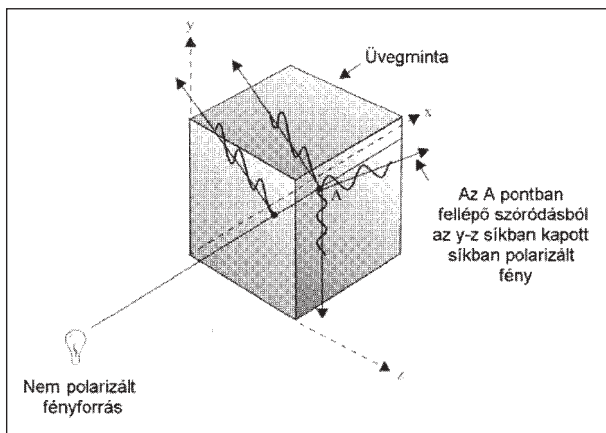
A teljes-hullámhossz lapok helyett gyakran alkalmaznak szabványos feszültségű körlemezeket. Míg az előbbi egy hullámhossznyi retardációt okoz a rajta áthaladó fényen, addig a körlemezek ennek töredékét vagy többszörösét is képesek kialakítani.

Edzett síküvegek fényáteresztéses módszerrel történő vizsgálata

A feszültségi sávok meghatározása és az eredő retardáció mérése az előbb tárgyalt pótelemek alkalmazása nélkül is elvégezhető. Ebbe a csoportba tartozik a Sénarmont kompenzációs módszer [13], amelyben negyedhullámhossz lap(ka)t alkalmaznak.

Sénarmont kompenzáció

A polarimétert először negyed-hullámhossz lap nélkül használjuk. A keresztezett állású polarizátort és analizátort együtt



8. ábra. Szórt fény az üvegmintában [11]

forogtatva fehér fény alkalmazása mellett izoklin sávot állítunk be az üveg minta kérdéses helyén. Így az adott ponton összehangoljuk a polarizátor és az analízátor polarizációs tengelyeit a σ_1, σ_2 fő feszültségi irányokkal. Ezután a két optikai elemet együtt 45° -kal továbbforogtatjuk. Ezáltal az izoklin sávok a legtávolabb kerülnek a mérési ponttól. A polarizátort és analízátort szétkapcsoljuk. Behelyezzük a negyed-hullámhossz lapot (ka), és az analízátort addig forogtatjuk, míg a kérdéses pontban teljes sötétedés nem lép fel. Ebben az állásban meghatározható a kérdéses pont rendűsége. A mérés ezen pontjáig fehér fényt használhatunk, a következő lépésekhez azonban monokromatikus fényforrásra van szükség. Az analízátort elforgatva a közeli sávok valamelyikét a mérési pontra mozdítjuk, majd az analízator elfordítási szögét feljegyezzük. A forgatás iránya általában az óramutató járásával egyező irányú, a forgatást azonban mindig abban az irányban kell végezni, amerre a minta környezete sötétedni kezd. Az analízator elfordítási szögéből a kérdéses pontban uralkodó feszültség kiszámítható, ha ismert az üveg feszültségoptikai együtthatója és vastagsága.

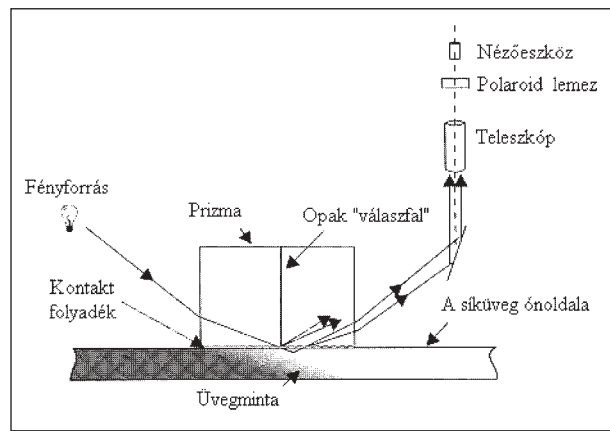
Edzett síküvegek fényvisszaveréses módszerrel történő vizsgálata

Szórtfény-módszer

Ha nem történik teljes fényáteresztés, a fénysugár saját hosszsa mentén szóródhat. Ez a szórt fény másodlagos rezgésnek tekinthető, amelyet a fő hullám hoz létre. A szórt fény iránya a fő terjedési irányra merőleges, sugárirányú. Bármely, a fő-irányra merőleges sugár irányából nézve a szórt fény síkban polarizáltnak látszik. Feltételezhetjük, hogy az ilyen szórt fénykomponensek száma végtelen (8. ábra).

A szórtfény-hatás kétféleképpen használható:

- természetes fényt alkalmaznak, polarizátorként a szóró közeg működik. A szórt fény megfigyelését egy külső analízator segítségével végzik;
- a fényforrás polarizált fény. A szórt fény szolgál analízatorként. A kapott sávokat telemikroszkóppal vizsgálják, vagy fénysokszorozóval érzékelik.



9. ábra. Felületi refraktométer [11]

Az utóbbi módszerrel könnyebb az információgyűjtés, ezért leggyakrabban ezt használják. A következőkben ezt a módszert ismertetjük. A síkban polarizált fénysugár a feszültséges mintába lépve két síkba hasad, a bemenetnél található fő feszültségeknek (σ_1, σ_2) megfelelően. Ahogy a fény áthalad az üvegen, a két komponens fázisa változik. Az eredő sugárirány mentén észlelhető szórt fény intenzitása ennek megfelelően alakul. Az intenzitás változása adja az interferenciasávokat. A sávok értékelése a következő összefüggés segítségével történik [14, 15]:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{\Delta N}{\Delta S} \frac{\lambda}{C} \quad (10)$$

ahol σ_1 és σ_2 a fő feszültségek a haladó fény irányára merőleges síkban, $\Delta N/\Delta S$ a [sáv száma, rendűsége versus éltől mért távolság] grafikon meredeksége a kérdéses pontban, λ az alkalmazott fény hullámhossza, C a feszültségoptikai együttható.

Síküveg esetén a felületre merőleges irányban a feszültség zérus ($\sigma_2 = 0$). Ebben az esetben a fenti egyenlet a következőképpen módosul:

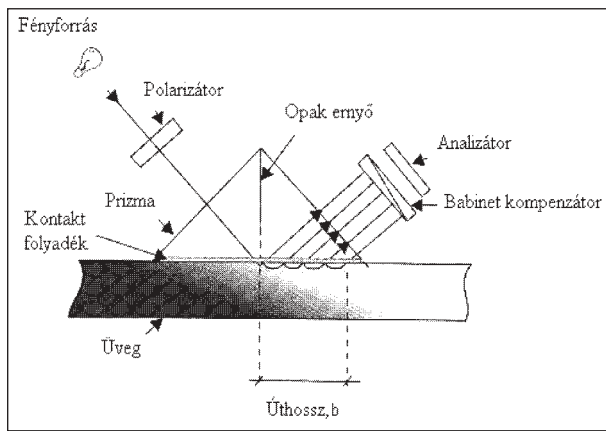
$$\sigma_1 = \frac{\Delta N}{\Delta S} \frac{\lambda}{C} \quad (11)$$

Edzett síküvegek feszültségmérése a felületi rétegekben

A termikus vagy kémiai edző eljárások hatékonyságának értékeléséhez gyakran mérik a feszültséget a felületen. Az erre alkalmas két berendezés a felületi refraktométer és a felületi polariméter.

Felületi refraktométer

A felületen mért feszültség egyenesen arányos a felületet képező töréssel, ha a polarizált fénysugár felületre merőleges és azzal párhuzamos hullámokat tartalmaz. Ez az össze-



10. ábra. Felületi polariméter [11]

függés a feszültségoptikai egyenlet egy változatával szemléltethető:

$$\sigma = C(n_1 - n_2) \quad (12)$$

ahol σ a feszültség a beeső fény síkjára merőleges felületben, C az üveg feszültségoptikai együtthatója, n_1 és n_2 a beeső fény síkjára merőlegesen, illetve a síkkal párhuzamosan rezgő fény törésmutatója.

A pontos eredmények eléréséhez (öt tizedesjegy pontosság) differenciális felületi refraktométert (DSR) használnak. A DSR működésének elve, hogy a fényt egy, a mérendő üvegmintán fekvő prizmán bocsátjuk át, így teljes reflexió történik az üveg felületében. A prizma törésmutatója nagyobb, mint a mérendő üvegé, ezért immerziós folyadékkal biztosítják az optikai érintkezést (9. ábra).

A prizma belépő és kilépő részét egy nem fényáteresztő réteg választja el egymástól. Ez megakadályozza, hogy a visszatükröződő fény bejuthasson a teleszkópba. Oda csak az a fény léphet be, amely n_1 és n_2 törésmutatóknak megfelelő kritikus szögek alatt esik az üveg felületére, a prizma kilépő felületéhez közel halad az üvegben, aztán a kritikus szöggel tér vissza a prizmába. Kilépéskor két fénysugár keletkezik. Ezeket a fénysugarakat a teleszkópban két fényes vonallá fókuszálják. Az egyik abból a polarizált fényből keletkezik, amely a minta felületével párhuzamos, a másik pedig abból, amelyik merőleges a minta felületére. A két vonal térköze egyenesen arányos a készülék tengelyére merőleges üvegfelület síkjában lévő felületi feszültséggel.

Mikrométer pontosságú mérőkészülékkel a térköz, d mérhető. A feszültség olyan felületen, amelynek iránya merőleges a prizma fő tengelyére:

$$\sigma = k \cdot d \quad (13)$$

ahol k konstans, értéke az üvegösszetételtől és berendezéstől függően eltérő [16, 17].

Felületi polariméter

Az analízis módszere olyan fény vizsgálatán alapul, amely kritikus szöggel esik az üveg felületére. Az eljárás a hullámvezető hatást használja ki, amelyet egy nagy óntartalmú síküveg alkalmazásával biztosítanak. A törésmutató eltérések ebben a rétegben akkorák, hogy a beeső sugár ívelt törést szenved. A keletkező sugarak felfelé, a prizma irányába haladnak, majd a kvarcéken vagy Babinet kompenzátoron áthaladva az analizátorba érnek (10. ábra).

A Babinet sávok feszültséges üveg esetén elfordulnak a feszültségmentes sávokhoz képest. Az elfordulás szögének tangense arányos a felszíni feszültséggel, amely a prizma fő tengelyére merőleges. Felületi nyomófeszültségek esetén a sávok ellenkező irányba fordulnak, mint felületi húzófeszültségeknél. Így ezzel a módszerrel az üveg felületi rétegében található feszültség mérhető.

A felületi refraktometria és a felületi polarimetria közötti legfontosabb különbség, hogy az utóbbi esetben a mérés eredménye a következő módon függ a b úthossztól:

$$\sigma = \delta / Cb \quad (14)$$

A polariméteres mérés könnyebben elvégezhető, mérési érzékenysége 5-10-szer nagyobb, mint a refraktométeresé. Ugyanakkor csak a síküvegek önoldali mérésére alkalmas, kémiai úton edzett üvegek vizsgálatára nem megfelelő [18].

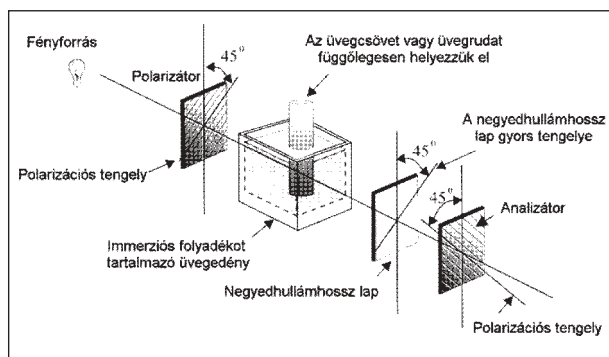
Laminált üvegek területi feszültségének mérése

A laminált üvegeket úgy állítják elő, hogy a két síküveg közé egy műanyag réteget helyeznek. Ez a réteg általában polivinil-butirál (PVB), amely ellenőrzött körülmények között nagy hő és nyomás esetén is alkalmazható. A laminált üvegekben lévő maradó területi feszültség mérése kompenzációval és goniometrikus kompenzációval végezhető. Ugyan a köztes réteg kettős törő, nem befolyásolja jelentős mértékben a bruttó retardáció értékét.

Figyelembe kell venni azt is, hogy a területi és vastagságbeli feszültségek mellett hajlítófeszültségek is felléphetnek, ha az üvegpárok íve egy kicsit is eltérő. Ilyen feszültségek fényáteresztésen alapuló módszerekkel nem mérhetők, mivel a megfigyelés irányában értékük nullához tart. Ezért a felületi polarimétert egy olyan segédeszközzel kell kiegészíteni, amely kimondottan kis mértékű maradó feszültségek vizsgálatára alkalmas.

Öblösüvegek feszültségének vizsgálata

Az edények többféle élt tartalmaznak mint a síküvegek, emiatt a maradó feszültség mérését jóval részletesebben kell elvégezni. Ennek ellenére egyszerű minőségi ellenőrzés is elvégezhető anélkül, hogy megkísérelnénk megállapítani a maradó feszültség abszolút értékét. Az üvegmintát polarizkóppal vizsgáljuk, teljes-hullámhosszú



11. ábra. Öblösüveg fotoelasztikus vizsgálata immerziós folyadék segítségével [11]

lemez vagy szabványos feszültségű körlemezek alkalmazásával.

Ha mégis részletes analízis a cél, az alábbi technikák egyikét kell elvégezni [19].

Immerziós folyadékok alkalmazása

Ha a fotoelasztikai analízis során a fény beesési szöge akkora, hogy refrakció következik be, az üveget olyan folyadékba kell meríteni, melynek törésmutatója a kérdéses üvegéhez nagyon közeli. Az eltérés legfeljebb 0,002 lehet. Meglehetősen nehéz azonban olyan folyadékot találni, melynek törésmutatója megfelelően közel van a kérdéses üvegéhez. Ezért két-, esetleg háromfajta folyadék összekeverésével állítják be a megfelelő törésmutató értéket. Közülük általában az egyik nagyobb, a másik (kettő) kisebb törésmutatóval rendelkezik, mint a vizsgált üveg. Ez a folyadék vagy folyadékelegy az ún. *immerziós folyadék*, amelyet olyan kádban tartanak, melynek oldalai fényáteresztők és feszültségmentesek (11. ábra). Ezek nagyon fontos feltételek, amelyek ha nem teljesülnek, akkor a kád anyaga is hozzájárul a fotoelasztikus sávok kialakulásához [20].

Gyűrűs metszet

Ahhoz, hogy megállapítsák az üveg feszültségének vastagság menti eloszlását, az üvegedényből gyűrűmetszetet készítenek. Az ilyen metszetek vizsgálatával megbecsülhető az üveg homogenitása, amely az üveghibák mennyiségéről is tájékoztat. Az analízishez körülbelül 10 mm magasságú gyűrűt kell készíteni, amelyet az edény oldalfalának felső harmadából vágunk. A metszetet egy megfelelő törésmutatójú fluidba merítik, és polarizálóval olyan irányban vizsgálják, amely párhuzamos az edény longitudinális tengelyével. A teljes-hullámhossz lemezt úgy állítják, hogy az 45°-os szöveget zárjon be a polarizátor és az analizátor tengelyével.

A vizsgálat a következőkre ad választ [19]:

a) az üveghibák mennyisége (finom szálszálrepedés, szélesebb repedések),

b) a szín intenzitása az üveghibákban,

c) az üveghiba nyomó- vagy húzófeszültséges,

d) a hiba helyzete a metszetben (belső vagy külső felületen van-e).

Üvegbotok és üvegszövek vizsgálata

A kialakuló maradó feszültség létrejöttét a termikus zsugorodás, a kis hőmérsékleten jelentkező elasztikuság, a nagy hőmérsékleten jelentkező viskoelasztikuság és a hűtés által létrehozott hőmérséklet-gradiens együttesen okozzák. Ezek a feszültségek (hossz mentén és keresztmetszetben) a külső felületen nyomófeszültségek, a belső felületen/a bot közepén pedig húzófeszültségek. A nyomófeszültségek az üveg szilárdsága szempontjából kívánatosak, ha akadályozzák a mikrorepedések növekedését. Egy adott érték felett azonban a nyomófeszültség káros hatású. Ezért jelentős a maradó feszültségek mérése és szabályozása.

A mérés egyik módszere a roncsolásos vizsgálat. Ekkor gyűrűt/körlemezt vágunk a mintából. Ez az eljárás azonban nem kivitelezhető, ha az üveg nagymértékben feszültséges. A mérést Sutton, Ritland és Read másképp valósították meg. A csövet, botot tangenciális irányból nézték olyan immerziós folyadékba merítve, melynek törésmutatója a vizsgált mintáéval egyezett. A mérésnél a polarizátor és az analizátor a függőleges irányhoz képest $\pm 45^\circ$ -os szögben áll. Az üvegszövet/üvegbot hosszmenti tengelye a függőleges tengellyel párhuzamos. A retardáció mérését elektromikroszkóp segítségével tangenciálisan végzik a külső felülettől befelé haladva, egyre növekedő távolságoknál. Kompenzációhoz a Sénarmont-technikát alkalmazzák. A retardációk mérése után a főfeszültségek értékelhetők [11].

Összefoglalás

Az üvegtermékek feszültségi állapotának minőségi és mennyiségi feszültségoptikai vizsgálatára alkalmas módszerek és eljárások ismertetése segítséget nyújt a sík- vagy öblösüveg termékekben lévő nem kívánt vagy szándékosan előidézett feszültségállapotok meghatározására. Az üveg összetételétől, gyártási feltételeitől és a továbbfeldolgozás jellemzőitől függő üvegfizikai tulajdonságok, mint a viszkozitás, hőtágulás, rugalmasság és hővezetés, együttesen határozzák meg az adott üveg feszültségállapotát.

Irodalom

- [1] West, A. R.: Solids State Chemistry and its Applications. John Wiley and Sons, Chichester, 1985.
- [2] Scholze, H.: Glas. Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- [3] Knapp O. – Korányi Gy.: Üvegipari kézikönyv. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1964.
- [4] Klindt, L. B. – Klein, W.: Az üveg mint építőanyag. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981.
- [5] Zarzycki, J.: Glasses and Amorphous Materials. In Materials

- Science and Technology, Volume 9, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1991.
- [6] MSZ ISO 7991:1992 Lineáris hőtágulási együttható meghatározása
- [7] MSZ ISO 7884-8:1991 Transzformációs hőmérséklet meghatározása
- [8] *Gardon, R.*: in Glass: Science and Technology, Volume 5, Elasticity and Strength in Glasses. Uhlmann, D. R., Kreidl, N. J. (Eds.), Acad. Press, New York, 1980.
- [9] *Gora, P. – Kiefer, W. – Sack, W. – Seidel, H.*: Glastechn. Ber., 50, (1977), pp. 319-327.
- [10] *Dannheim, H. – Oel, H. J.*, in: Festigkeit keramischer Werkstoffe, DFG (Ed.), Deutscher Verband für Materialprüfung, e.V., Berlin, 1983.
- [11] *McKenzie, H. W. – Hand, R. J.*: Basic Optical Stress Measurement in Glass. Society of Glass Technology, Sheffield, 1999.
- [12] *Frocht, M. M.*: Photoelasticity. John Wiley and Sons, Volume 1-2, Chichester, 1948.
- [13] *Kuske, A – Robertson, G.*: Photoelastic Stress Analysis. John Wiley and Sons, Chichester, 1977.
- [14] *Holister, G. S.*: Experimental Stress Analysis. Cambridge University Press, Cambridge, 1967.
- [15] *Dally, J. W. – Riley, W. F.*: Experimental Stress Analysis. McGraw-Hill Book Co., London, 1965.
- [16] Anon: Stress Measuring Device (SMD) Technical Manual. Gaertner Scientific, 1985.
- [17] *Ansevin, R. W.*: The Non-Destructive Measurement of Surface Stresses in Glass. ISA Transactions, 1965.
- [18] *Redner, A. S.*: A Comparison of Stress Measurement Techniques. Glass, New York, 1993.
- [19] *Paul, A.*: Chemistry of Glasses. Chapman & Hall, London-New York, 1990.
- [20] *Smolik, O. – Bellow, D. G.*: On the Mixing of Photoelastic Immersion Fluids. Exp. Mech., 1974.

* * *

RENDEZVÉNYEK

Nemzetközi Betonkongresszus

A Dundee-i Egyetem (Nagy-Britannia) arról nevezetes, hogy háromévenként nemzetközi betontechnológiai és tervezési kongresszust rendez. A legközelebbi ilyen tudományos esemény **2005. július 5–7-én** lesz „Globális építkezés: végső lehetőségek a betonban” címmel (Global construction: Ultimate concrete opportunities).

A szervezőbizottság szerint a 2005-ös kongresszus különönböző fog az elődjétől, amennyiben interaktív lesz. 10 fontos témát választottak ki, melyek a kongresszus címében jelzett célkitűzést valósítják meg:

- Cementfajták az időálló beton készítéséhez
- Szállítható, infrastruktúra készítésére alkalmas beton
- Tervezési és minőség-ellenőrzési szabványok
- Időállóság és betontervezés
- Betonszerkezetek javítása és felújítása
- Habbeton alkalmazása
- Adalékszerek
- Nanotechnológia alkalmazása a betonban
- Beton a nukleáris technológiában
- Fiatal kutatók fóruma

Látható, hogy a rendezőbizottság a betontechnológia és tervezés legfontosabb kérdéseit tűzte a kongresszus napirendjére. Remélhető, hogy sok szakember részt vesz ezen a fontos kongresszuson.

A szervezőbizottság kéri az előadókat az alábbi időpontok betartására:

- 2004. február 27. – kb. 300 szavas kivonat beküldése.
- 2004. március 15. – értesítés a kivonat elfogadásáról.
- 2004. július 30. – a nem végleges teljes kézirat beküldése.
- 2004. október 29. – a lektorok által javasolt változtatások közzéte.
- 2005. január 14. – a végleges kézirat beküldése.

Kérek mindenkit, aki ezen a fontos kongresszuson részt

kíván venni vagy előadást kíván tartani, az alábbi címre juttassa el kivonatát: Prof.R. K. Dhir, OBE, Director, Concrete Technology Unit, University of Dundee, Dundee, DD1 4HN, U. K. Dhir professzor e-mail címe: r.k.dhir@dundee.ac.uk; a kongresszusról a www.ctucongress.co.uk web-oldalon lehet olvasni.

Az a megtiszteltetés ért, hogy a kongresszus Tudományos Bizottságának tagjává választottak. Kérem a résztvevőket, szerzőket, hogy részvételi szándékukról, ill. kéziratukról engem is szíveskedjenek tájékoztatni. Postacímem: Veszprémi Egyetem, Szilikát- és Anyagmérnöki Tanszék, 8201 Veszprém, Pf. 158. E-mail címem: tamasf@almos.vein.hu

Dr. Tamás Ferenc

* * *

Szilikátipari Tudományos Egyesület képviselőit meghívták a Magyar Országgyűlés Gazdasági Bizottsága Infrastruktúrafejlesztési és Lakásügyi Albizottsága 2003. november 19-i ülésére.

A *Horváth Csaba* elnök – képviselő – vezette ülésen *Fegyverneki Sándor*, az Országos Lakás- és Építésügyi Hivatal elnöke mutatta be hivatalát, és ismertette jövőbeni feladatit.

Szervezeti felépítés szerint:

- az építésügyet elnökhelyettesként *Kovács Imre*,
- a lakásügyet elnökhelyettesként *Leitner József*,
- az építésgazdaság ügyét *dr. Juhász István* fogja irányítani.

A hivatal sokrétű feladataiban számít a tudományos egyesületek aktív közreműködésére is, amelyben az SZTE főleg az építőanyag-ipar nemzetközi versenyképességének javítása érdekében, valamint az EU-csatlakozással kapcsolatos feladatokban tud segítséget nyújtani.

Rendezvényeinken, szakmai kiállításainkon a magyar és nemzetközi kutatási és fejlesztési eredmények széles körű ismertetésével kívánjuk az építőipar szakmai fejlődését támogatni.

Dr. Rudnyánszky Pál

Különböző összetételű vályogok fizikai és mechanikai vizsgálatai

Büki Péter

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék

Témavezetők: Csányi Erika, Józsa Zsuzsanna

1. Bevezetés

Az épített környezet nagymértékben tükrözi az ott élő emberek életmódját, világlátását, értékrendjét. Ha magunk elé képzelünk egy XX. század eleji magyar falut, girbe-gurba utcáival és házaival, valamint egy lakótelep szürke tömbjeit, akkor érezzük, hogy az előbbi szervesen kapcsolódik a környezetéhez, de ez az utóbbiról nem mondható el. Mint egy madárfészek, ahogy a fa ágaira ráépül, úgy nőttek ki falvaink réges-régen a földből. Az ember továbbépítette a természetet azokból az anyagokból, amiket a helyszínen talált. Mai világunkban ritka az a szemlélet, hogy az épített környezetet figyelve, a helyi anyagokból, a helyi adottságokat kihasználva, a helyi hagyományokat tiszteletben tartva építsünk. Nagyon fontosnak tartom, hogy ezek a szempontok is fontossá váljanak a jövő embere számára.

Hazánkban szinte mindenhol helyi anyagnak számít a vályog. Ez a természet nyújtotta egyszerű, kézenfekvő építőanyag a modern korban igen háttérbe szorult, általában a negatív tulajdonságait szokták kiemelni, a kis szilárdságot és a jelentős vízerzékenységet. Ha meggondoljuk, ezek a „negatív” tulajdonságok inkább jó tulajdonságok. Amennyiben megvédjük a nedvességtől a vályogot (vakolat, messze kinyúló eres, jó szigetelés stb.) és csak egy vagy kétszintes házat építünk, akkor mindezeket a rossz tulajdonságokat kiküszöböltük; ám a vályog környezetbarát volta éppen a vízerzékenységében rejlik, hiszen a víz hatására újra visszatér a természetbe. A természet tökéletesen felépített körforgása játszódik le egy vályogház megszületése és elmúlása során. A vályog bármikor visszaforgatható a természetbe hulladék keletkezése nélkül.

Diplomamunkám témájául a vályoggal való kísérletezést választottam. Kétfajta agyagból készült vályogot vizsgáltam, elsősorban a különböző adalékanyagok és a kézi, illetve gépi préselés hatását a vályog fizikai tulajdonságaira. Ezekon a vizsgálatokon keresztül elsősorban azt próbáltam megtudni, mely adalékanyagokkal érdemes a vályog tulajdonságait javítani, döntő-e a különbség a kétfajta agyag, a préselt és nem préselt, a természetes és mesterséges szállal adagolt vályog fizikai és mechanikai tulajdonságai között. Vizsgáltam továbbá a cementtel való stabilizálást is.

2. A vályog fizikai tulajdonságai

Testsűrűség

Az agyagba szálás adalékanyagokat keverve egyre kisebb testsűrűségű vályogot kapunk (1. táblázat). A testsűrűség alapvetően befolyásolja a vályog fizikai tulajdonságait, ezért a felhasználás módját is. Például könnyűvályogot nem ajánlatos teherhordó falszerkezetként beépíteni, mert túl kicsi a szilárdsága.

1. táblázat

A különböző vályogok testsűrűség szerinti besorolása [1]

| | |
|----------------|-----------------------------|
| Könnnyűvályog: | 300-1200 kg/m ³ |
| Szalmavályog: | 1200-1700 kg/m ³ |
| Tömör vályog: | 1700-2000 kg/m ³ |
| Nehézvályog: | 2000-2200 kg/m ³ |

Szilárdság

A vályog szilárdságát számos tényező befolyásolja: az agyagfajta, az adalékanyag fajtája (szalma, fenyőtű, törek stb.), mennyisége és a bedolgozás módja (döngölt, préselt stb.). A vályog nyomószilárdsága ezért tág határok között változik: 0,15 N/mm²-ről megfelelő javítóanyagokkal akár 5,0 N/mm²-re is felvihető. Szakirodalmi adatok szerint a vályog nyomószilárdsága a testsűrűség függvényében az 2. táblázat szerint változik.

2. táblázat

A vályog testsűrűségének és nyomószilárdságának kapcsolata [2]

| Testsűrűség, kg/m ³ | Nyomószilárdság, N/mm ² |
|--------------------------------|------------------------------------|
| 1600 | 2 |
| 1900 | 3 |
| 2200 | 4 |

A növényi rostok a nyomószilárdságot és a testsűrűséget egyaránt befolyásolják (3. táblázat).

3. táblázat

Növényi rostokkal kevert vályog fő jellemzői [2]

| Testsűrűség, kg/m ³ | Nyomószilárdság, N/mm ² |
|--------------------------------|------------------------------------|
| 850 | 1,75 |
| 1600 | 2,5 |

A vályog hajlító-húzó szilárdsága átlagosan hatoda a nyomószilárdságnak, földnedves vályog esetén 0,004-0,08 N/mm². A húzószilárdság növényi rostok vagy akár mesterséges szálak bekeverésével növelhető.

Kötőerő

Azt az ellenállást, amit a képlékeny vályog a szakítópróbánál teljesít, kötőerőnek hívjuk. 50 g/cm² alatti kötőerőnél a vályog nem alkalmas építésre. A 4. táblázat a vályogok kötőerejét tartalmazza.

4. táblázat

Vályogok kötőereje [3]

| Vályog | Kötőerő, g/cm ² |
|---------------|----------------------------|
| Nagyon sovány | 50–80 |
| Sovány | 80–110 |
| Kicsit zsíros | 110–200 |
| Zsíros | 200–280 |
| Nagyon zsíros | 280–360 |
| Agyag | 360 < |

Nedvességtartalom

Tömegszázalékban kifejezve a tiszta vályog nedvességtartalma 0,5-5,0% között változik, de növényi rostokat belekeverve ez a 15%-ot is elérheti [2].

Zsugorodás

A száradási zsugorodás a nagy agyagtartalmú vályogoknál nagy, vagyis minél soványabb a vályog, annál kisebbet zsugorodik. Az agyag fajtája és a víztartalom is befolyásolja a zsugorodást. Földnedves sovány agyagoknál ez 1%, de „zsíros” agyagoknál akár 7,5% is lehet. A zsugorodás jórészt már az építési fázisban lezajlik, vagyis néhány hét alatt [2].

3. Kísérletek

3.1. A kísérlet előkészítése

A vizsgálatokhoz szükséges próbatesteket részben én készítettem el, részben a Naturbau Kft. kézi préselésű, illetve a fehérvári téglagyár gépi préselésű vályogtéglaikat használtam fel. Az általam elkészített kézi vetésű vályogtéglaikhoz az agyagot szintén az imént említett helyekről szereztem be. A fehérvári agyag viszonylag sovány, karbonátos volt, míg a pankaszi kövérebb, képlékenyebb, finom szemszerkezetű, karbonátmentes. A próbatestek kézi vetéssel készült 20 × 11 × 7 cm oldalhosszúságú téglák voltak. A vályogvetést laboratóriumban végeztem egyszerű eszközöket használva, mint talicska, lapát, fa vályogvető keret stb. A téglák száradása is bent, jelentős napfénytől, nedvességtől és hőingadozástól védve tör-

tént, így közelítőleg hasonló feltételek mellett száradtak a különböző időben elkészített vályogtéglaik. 19 különböző összetételű vályogtéglaikat készítettem (5. táblázat), fajtánként 8-10 darabot. Emellett a 6. táblázat szerinti kétfajta préselt vályogtéglaikat is bevontam a kísérletbe.

5. táblázat

Kézi vetésű vályogtéglaik összetétele

| Minta jele | Összetétel | Minta jele | Összetétel |
|-----------------|-------------------------------------|----------------|--------------------------|
| Fehérvári agyag | | Pankaszi agyag | |
| F1 | 100% agyag | P1 | 100% agyag |
| F2 | 80% agyag, 20% homok | P2 | 80% agyag, 20% homok |
| F3 | 70% agyag, 30% homok | P3 | 65% agyag, 35% homok |
| F4 | agyag, szalma | P4 | 50% agyag, 50% homok |
| F5 | agyag, fenyőtű | P5 | 60% agyag, 40% fűrészpor |
| F6 | „F2” + 2% cement | P6 | „P3”, szalma |
| F7 | „F2” + 5% cement | P7 | „P3”, fenyőtű |
| F8 | „F2” + 8% cement | P8 | „P2” + 2% cement |
| F9 | 60% agyag, 40% fűrészpor (keményfa) | P9 | „P2” + 5% cement |
| F10 | agyag, műanyag szál | | |

6. táblázat

Préselt vályogtéglaik összetétele

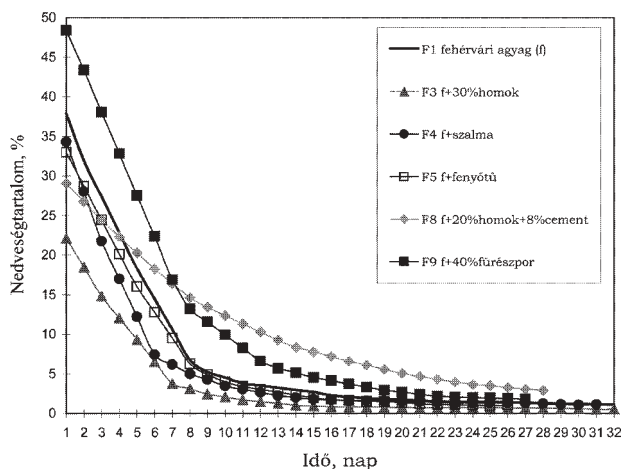
| Minta jele | Összetétel | Préselés |
|------------|----------------------------|----------|
| Fp | fehérvári agyag, fűrészpor | gépi |
| Pp | pankaszi agyag, szalma | kézi |

3.2. Vizsgálatok

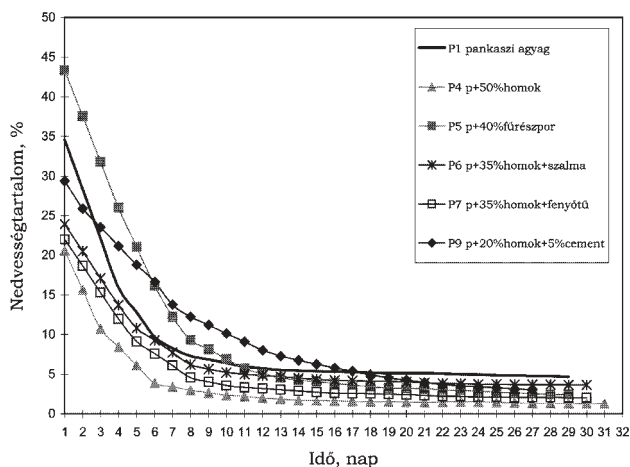
Száradás, száradási zsugorodás

Azokat a téglákat használtam föl a nedvességtartalom-változás mérésére, amelyeket már az elkészítésükkor műanyag tálcára tettem, és amelyeken a zsugorodást mértem. A téglákat közel azonos konzisztenciájúra kevertem, de nem volt egyforma a kezdeti nedvességtartalmuk. A műanyag tálcák tömegét gramm pontosságú mérlegen mértem meg, mielőtt rájuk helyeztem a téglákat. Ettől kezdve a hétvége kivételével minden nap mértem a tömegüket tálcával és az időközben keletkezett törmelékkel együtt, ami a vályogtéglaikról vált le. A méréseket tömegállandóságig, azaz az egyensúlyi nedvességtartalom beállásáig folytattam. A tömegmérések eredményeiből nedvességtartalmat (w) számoltam (1. és 2. ábra).

A száradási zsugorodást mindenfajta vályogból két próbatesten (téglán) mértem. Úgy gondoltam, hogy a milliméter pontos leolvasás elegendő ahhoz, a különböző összetételű vályogok zsugorodását összehasonlíthassam, ezért a mérést egy egyszerű milliméter-osztású vonalzóval végeztem. A téglák elkészülte után rögtön mindenfajta vályogból műanyag tálcára tettem kettőt, és a még képlékeny vályog felső felületére rányomtam hosszanti irányban a vonalzó élét úgy, hogy nyomot hagyjon, és attól kezdve



1. ábra. Fehérvári agyagból készült különböző összetételű vályogtéglák száradása, a nedvességtartalom időbeli változása



2. ábra. Pankasi agyagból készült különböző összetételű vályogtéglák száradása, a nedvességtartalom időbeli változása

mindig abban a nyomban mértem a téglá hosszát. A téglák 20–22 °C-on száradtak, 50-55% relatív páratartalom mellett. A mérést minden nap elvégeztem (kivéve hétvégéken) mindaddig, amíg már nem észleltem több napja változást.

Mivel minden vályogfajtából két téglán mértem hosszváltozást, ezért két eredményt kaptam egyfajta vályogra. A két értéksort nem vontam egybe, hanem az egyiket kiválasztottam, annak a téglát, amelyik kevésbé repedt meg, vagy amelyiknek szabályosabb volt az alakja, vagyis a mérés is pontosabb lehetett. Az eredményeket a 7. táblázatban foglaltam össze.

7. táblázat

Kísérleti vályogtéglák száradási zsugorodása

| Minta jele | Zsugorodás, % | Testsűrűség, kg/m ³ | Minta jele | Zsugorodás, % | Testsűrűség, kg/m ³ |
|------------|---------------|--------------------------------|------------|---------------|--------------------------------|
| P 1 | 9,0 | 1890 | F1 | 7,2 | 1530 |
| P 2 | 7,7 | 1850 | F2 | 4,7 | 1680 |
| P 3 | 6,4 | 1890 | F3 | 3,6 | 1830 |
| P 4 | 4,8 | 1830 | F4 | 5,8 | 1490 |
| P 5 | 9,7 | 1540 | F5 | 3,9 | 1550 |
| P 6 | 5,4 | 1770 | F6 | 2,9 | 1510 |
| P 7 | 5,4 | 1800 | F7 | 1,5 | 1470 |
| P 8 | 4,2 | 1590 | F8 | 0,5 | 1480 |
| P 9 | 0,7 | 1520 | F9 | 3,4 | 1270 |
| | | | F10 | 2,4 | 1440 |

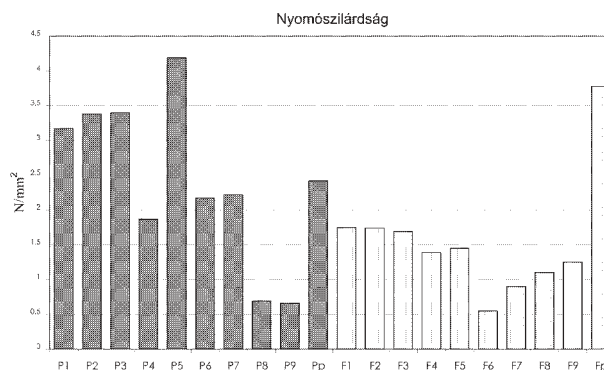
Nyomószilárdság

A nyomószilárdság vizsgálatához a kisméretű téglák szilárdságvizsgálatához hasonlóan páronként cementhabarccsal ragasztottam össze vályogtéglákat, és alul-felül is habarcssimítást készítettem. A habarcs összetétele 2 rész finomhomok (0–2), 1 rész 32,5-es kohósalak-portlandcement volt. A cementhabarcs hétnapos korában törtem el a próbatesteket. A tönkremenetel kezdetéig fejttem ki nyomóerőt a próbatestekre, és ebből a nyomóerőből számoltam nyo-

mószilárdságot. Minden egyes vályogfajtából három próbatestet törtem el, és a három nyomószilárdság átlagából számoltam az átlagos nyomószilárdságot. A nyomószilárdság számításához szükséges volt minden próbatest nyomóerőre merőleges legkisebb keresztmetszeti területét meghatározni, ami a téglák zsugorodása, deformáltsága miatt nem mindig egyezett meg a törőlapokkal érintkező felületekkel. A legkisebb hossz és szélesség megmérését minden téglánál közvetlenül a törés előtt tolmérővel végeztem (3. ábra).



3. ábra. A nyomószilárdság vizsgálata

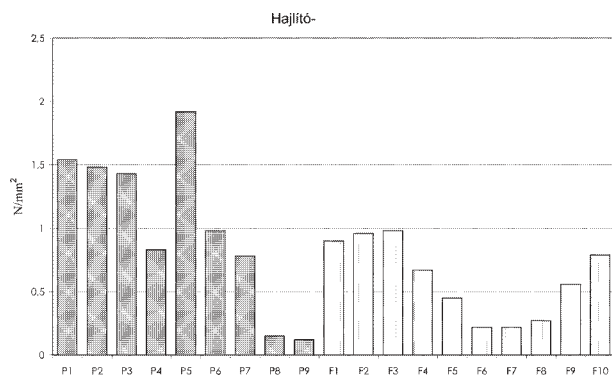


4. ábra. A nyomószilárdság-vizsgálat eredményei

A gyárilag préselt téglákon is mértem nyomószilárdságot, de ezeket nem habarcsoltam össze páronként, mivel a nagyságuk megfelelő volt. Alul-felül ezeknél is végeztem habarcssímítást, mert bár formájuk szabályosabb volt, mint az én általam kézzel vetett tégláké, nem volt eléggé egyenletes ahhoz, hogy ne keletkezzenek feszültségcsúcsok a nyomóvizsgálat során. A vizsgálat eredményét a 4. ábrán mutatom be.

Húzó-hajlító szilárdság

A hajlítószilárdsági vizsgálatához mindenfajta vályogból három darabot használtam fel. A próbatestek 60 °C-on szárítószekrényben tömegállandóságig szárított téglák voltak (ezeket használtam fel a száraz testsűrűség meghatározásához). A téglákat középen egy koncentrált erővel terhelve (térben nézve vonal menti teher) a tönkremennel kezdetéig növeltem az erőt. Minden egyes téglát törése előtt lemértem a téglák keresztmetszeti méreteit középen, ahol az erővel terheltem. A mérési eredményeket az 5. ábrán tüntettem fel.



5. ábra. A hajlító-húzó szilárdság vizsgálatának eredményei

Vízbeszívódás

A mérés célja a P1, P4, P5, P9, F1-es jelű kézi vetésű vályogtéglák, valamint az Fp, Pp jelű préselt vályogtéglák vízbeszívódásának vizsgálata volt. A méréshez használt

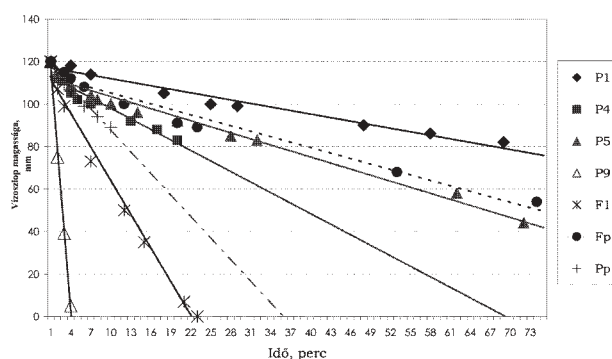


6. ábra. A vályogtéglák vízbeszívódásának mérése

próbatestek légszár az állapotú, egész vályogtéglák voltak. A téglák egyenletesebb felületére a 6. ábra szerint egy milliméterosztással ellátott üvegpipát erősítettem fel szilikonos tömítőanyaggal, vízzáró módon.

A tömítőanyag megszilárdulása után vizet töltöttem a pipákba azonos magasságig, és időnként leolvastam a vízszint magasságát. A leolvasások gyakorisága eltérő volt az egyes vályogoknál, a vízbeszívódás sebességétől függően. A mérést addig folytattam, amíg a mérőpipa osztott szárából az összes vizet be nem szívta a vályog.

A mérés során a vályogtéglák vízzel érintkező felülete erősen mállani kezdett, ezért az üvegpipák aljára a víz által kimosott szemcsék leülepedtek, ezáltal befolyásolták a vízbeszívódását. Nagyjából hasonló módon játszódtott le ez a folyamat a különböző fajta vályogtéglák esetén, ezért összehasonlításnak megfelelnek a 7. ábrán bemutatott eredmények.



7. ábra. A vízbeszívódás-vizsgálat eredményei

3.3. A vizsgálati eredmények értékelése

A pankaszi (kövér) és fehérvári (sovány) agyagok összehasonlítása

Az biztosan megállapítható, hogy a pankaszi agyag jobban zsugorodik, ami építési felhasználás során hátrány, de lényegesen nagyobb szilárdságú, kevésbé vízérzékeny, és ami nagyon érdekes, hogy a hozzáadott (ismeretlen eredetű, de biztosan keményfa) fűrészpor stabilizáló hatással volt rá, míg a fehérvári agyagra alig. A fehérvári agyag alkalmasabbnak tűnt cementtel való stabilizációra.

Préselés hatása

A préselés következtében a vízbeszívódás csökkent, ezáltal a vízérzékenység is. A préselés mértéke valószínűleg gépi úton nagyobb, mint kézi módszerrel, tehát hatásosabb is a vízérzékenység csökkentésére. A nyomószilárdságot is jelentősen megnövelte a préselés.

Természetes vagy mesterséges szál?

A természetes szálak – mint szalma és fenyőtű – közül a szalma tűnt hatásosabbnak, legalábbis a hajlító-húzó szilárdság

lárdságot növelő hatása nagyobb volt, és valószínűleg a hőtechnikai jellemzők szempontjából is jobb. A műanyag szállal kevert vályogtéglák nagyobb szilárdságúak voltak, és a zsugorodást is határozottabban csökkentette a műanyag szál, ám a szalma következtében a víz hamarabb eltávozott a vályogtéglából. Azt a következtetést azért le lehet vonni, hogy érdekesebb szalmát használni, mivel olcsóbb, könnyebb beszerezni (főleg vidéken) és környezetbarát is.

Adalékanyagok hatása

A cement kifejezetten rossz hatással volt a legtöbb tulajdonságra, kivéve a zsugorodást. Mivel a cement következtében minimálisan zsugorodott a vályog, szerkezete laza maradt a víz eltávozása után, tele pórusokkal, így a szilárdsága is erősen lecsökkent amellett, hogy vízérzékenysége drasztikusan megnőtt. A száradás során a víz lassan távozott el, ám a vízbeszívódási kísérletnél a leg hamarabb szívta magába a vizet. Ezek az igen negatív eredmények megleptek, mivel elvileg cementtel stabilizálni szokták a vályogot. Az mindenestre leszűrhető, hogy nem mindegy milyen agyagot, milyen mennyiségű cementet adunk a vályoghoz, és valószínűleg préselés esetén jönnek ki a cement stabilizáló tulajdonságai.



8. ábra. Megfigyelhető, hogy a fűrészpor elszínezte a pankaszi agyagból készült vályogtéglákat (jobb oldali elemek)

Az adalékanyagok nagyrészt csökkentették a zsugorodást, miközben a szilárdságot is csökkentették, de nyilvánvaló, hogy a tiszta agyag nem alkalmas építési használatra, ezért az adalékanyagokkal járó szilárdságcsökkenést el kell fogadni (persze egyes adalékanyagok szilárdságnövelő hatásúak). Meglepetésként ért, hogy az általam használt ismeretlen eredetű fűrészpor elszínezte a pankaszi agyagból készült téglákat, melyek a vályogvetést követő száradás során egyre keményebbek és sötétebbek lettek, és ránézésre is megállapíthatóan erősen zsugorodtak, formájuk kicsit eltorzult (8. ábra).

A szilárdságuk kiemelkedően jó lett, a vízbeszívódási kísérleteknél is jó eredmények születtek. Ezt a fűrészport vízbe áztattam, és hamarosan sötétbarna lett a víz, vagyis a víz hatására kioldódó anyag(ok) okozhatták ezt a különös stabilizációt.

4. Összefoglalás

A vályoggal végzett kísérleteim sok tanulságot szolgáltatottak, de igazából a válaszok mellett még több kérdést vetettek föl bennem. A préselés egyértelműen stabilizáló és szilárdságnövelő hatású. A száradási zsugorodás csökkentésére alkalmas a szalma és a homok, de kismértékben csökkenthetik a szilárdságot, és növelik a vízérzékenységet. A cementtel a legkörülményesebben kell eljárni, csak préselt vályogtéglák esetén alkalmazható hatásosan, ahogy van is rá példa Magyarországon (BIOECO földtégla). Bizonyos fűrészporok stabilizáló hatással lehetnek a vályogra, de ezt még érdemes lenne tovább kutatni.

Irodalom

- [1] *Dr. Szűcs Miklós*: Föld- és vályogfalak építése. Építésügyi Tájékoztatói Központ Kft., Budapest, 1997.
- [2] *Molnár Viktor*: Olcsó és környezetbarát vályogépítéset. Építőanyag. 51. évf. 1999. 1. szám.
- [3] *Lehmbau Regeln*: Dachverband Lehm. e. V. Vieweg ? Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 1999.

* * *

PORTAL BUDAPEST

Nemzetközi Nyílászáró-, Üvegipari, Kapu- és Árnyékolástechnikai Szakkiállítás Budapest, Sportaréna, 2003. november 6–9.

„Nyitunk minden újra.” E jelmondat jegyében adott minden érdeklődőnek randevút négy egymást kiegészítő szakma, az építészeti üvegfeldolgozás, az ajtó-ablak gyártás, az árnyékoló- és kaputechnika. A kiállítás célja az volt, hogy mutassa be a szakmai újdonságokat a szakembereknek és az építkezést, illetve felújítást fontolgató nagyközönségnek.

A rendezők és szakmai körök szerint a PORTAL BUDAPEST Szakkiállítás a közép-európai régió meghatározó

trendvásáraként kívánt beilleszkedni az építési célú szaktársarok és konferenciák közé.

A kiállításon mutatkozott be először a NEMZETI MINŐSÉGI VÉDJEGY Közhasznú Társaság, amelyet szakmai érdekképviseleti szervezetek, közöttük a MATA Magyar Ajtó-Ablak Egyesület és a Magyar Üvegipari Szövetség hívtak létre.

A kiállításhoz társuló rendezvények közül kiemelkedett a VII. Országos Épületenergetikai Konferencia, amely az „Eredmények és várakozások a lakóépületek energetikai korszerűsítésében az EU küszöbén” alcímet viselte. A szakkiállításra a belépés díjmentes volt. A kiállításon részt vett: Ausztria, Egyesült Királyság, Franciaország, Hollandia, Lengyelország, Magyarország, Olaszország, Románia, USA, Törökország összesen 122 kiállítója.